

ANÁLISE BIDIMENSIONAL DA PROTEÇÃO TÉRMICA POR ABLAÇÃO

Aluisio Viais Pantaleão - aluisio@mec.ita.br

Cláudia Regina de Andrade - claudia@mec.ita.br

Edson Luiz Zaporoli - zaporoli@mec.ita.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Departamento de Energia – IEME
Pça Marechal Eduardo Gomes, 50 - 12228-900 - São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo: Este trabalho reporta uma análise de proteção térmica por ablação utilizando uma abordagem entálpica para mudança de fase em problemas bidimensionais. Na solução numérica deste problema, a discretização no espaço foi feita utilizando-se o método de elementos finitos de Galerkin com um procedimento totalmente implícito e iterativo no tempo, para capturar o efeito do calor latente de ablação durante o desgaste da superfície da proteção térmica. Por fim, os resultados obtidos foram comparados com a literatura específica, onde foi verificada uma boa concordância.

Palavras-chave: Método Entálpico, Elementos Finitos, Proteção Térmica, Ablação.

1. INTRODUÇÃO

O processo de ablação envolve uma evaporação ou uma pirólise na superfície de um material submetido a um elevado fluxo de calor. Sob o ponto de vista de proteção térmica tal processo ocorre devido ao aquecimento por atrito, oriundo da interação entre o material ablativo e o escoamento em alta velocidade. No caso de materiais que se desgastam por um processo físico, quando é atingido o ponto de fusão ou de sublimação do material, se dá início a ablação. Aparece então, na superfície do material, uma camada líquida ou gasosa, que é transportada por convecção, da interface para a camada limite. Devido às condições de reentrada atmosférica, o material ablativo usualmente é vaporizado, se mistura no meio do gás da camada limite, reduzindo assim a transferência de calor por convecção e aumentando a espessura da camada limite.

Na literatura existe uma vasta gama de trabalhos que tratam do problema de ablação. Sutton (1982) faz uma descrição dos desenvolvimentos iniciais ocorridos na década de 50 e início de 60 das proteções térmicas que utilizam materiais ablativos em aplicações espaciais e veículos hipersônicos.

Considerando a condução de calor unidimensional em um cilindro semi-infinito, Biot et al. (1964) utilizaram uma análise variacional para estudar o fenômeno de ablação, considerando a condutividade térmica como função da temperatura e a capacidade térmica constante. Neste trabalho, estabeleceu-se uma expressão para o cálculo da distância da penetração da frente de fusão para regime permanente.

Os primeiros trabalhos numéricos sobre ablação utilizavam uma abordagem onde o sistema de coordenadas era fixo e o material utilizado também. À medida que a superfície era desgastada,

eliminavam-se sucessivamente, os nós da malha computacional que recobriam o domínio na região “queimada”. Este procedimento resultava em uma instabilidade numérica. Posteriormente, os trabalhos sobre ablação adotaram uma abordagem (no caso unidimensional) onde o material da proteção se deslocava em direção à origem do sistema de coordenadas com uma velocidade igual à velocidade de desgaste da superfície, de modo que a face aquecida permanecia sempre na origem. Neste procedimento é necessária a determinação da velocidade de desgaste a partir de uma equação obtida através de um balanço de energia na superfície aquecida Blackwell (1988). Este último autor utilizou o método dos volumes finitos com diferenciação exponencial para ponderar os termos convectivos à montante do escoamento na predição de ablação unidimensional.

A abordagem entálpica para mudança de fase em problemas de ablação foi utilizada por Storti (1995). Este autor considerou que o material da proteção térmica ainda virgem e o “queimado” pertenciam a um mesmo domínio, o primeiro com as propriedades térmicas do material ablativo e o “queimado” representado por uma fase fictícia com calor específico nulo, para que esta fase não absorvesse energia após a queima. Na transição entre estas fases, o material absorve o “calor latente de ablação” incorporado na entalpia como função da temperatura. No entanto, na implementação computacional da abordagem de Storti (1995), verificou-se uma instabilidade associada ao calor específico nulo. Para evitar este problema, propôs-se neste trabalho, que a fase fictícia tenha o mesmo valor do calor específico do material virgem, mas com um valor muito alto de condutividade térmica, resultando, também, em um alto valor de difusividade térmica. Esta solução foi testada para o caso unidimensional nos trabalhos de Leite e Zaporoli (1999), Pantaleão et al. (1999) e Ferreira (2002).

No presente trabalho, foi estudada a análise bidimensional da proteção térmica por ablação utilizando uma abordagem entálpica para mudança de fase em problemas bidimensionais. Os resultados obtidos foram comparados com a literatura específica, onde foi verificada uma boa concordância.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA – ABORDAGEM ENTÁLPICA PARA ABLAÇÃO

Para adaptar a formulação entálpica utilizada em mudança de fase (onde o domínio fica fixo) para o problema de ablação, deve-se utilizar um material fictício para representar a região da proteção térmica que já foi consumida pelo processo de desgaste. Como na ablação o fluxo de calor incide diretamente na superfície de desgaste e depende de suas propriedades, então, isto impõe algumas restrições nas características do material fictício.

O fluxo de calor devido ao aquecimento aerodinâmico depende da temperatura da superfície de ablação (nesta formulação interior ao domínio) e para que a temperatura da superfície original tenha um valor aproximado ao da temperatura de ablação, a condutividade térmica do material fictício deve ser elevada para reduzir os gradientes de temperatura a valores mínimos. A equação da energia para a formulação entálpica é dada pela Eq. (1).

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot [k \nabla T] \quad (1)$$

onde ρ , é a densidade, H a entalpia, T a temperatura e k a condutividade térmica do material, $\nabla \cdot$ é o operador divergente e t o tempo.

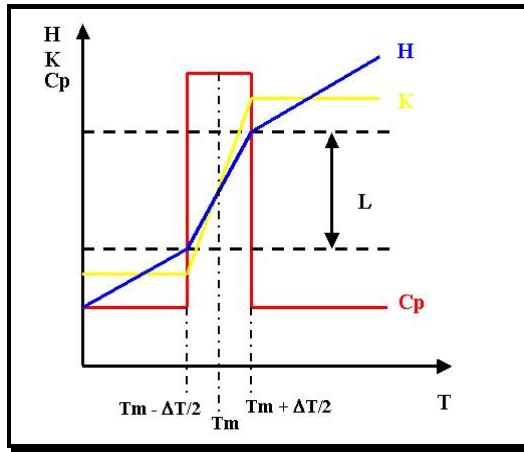


Fig. 1 - Propriedades térmicas do material ablativo em função da temperatura

A relação entre temperatura e entalpia para o material ablativo original e para o material fictício deve englobar o “calor latente de mudança de fase”. É importante ressaltar que a entalpia sofre uma variação abrupta quando a temperatura se aproxima da temperatura de mudança de fase, conforme apresentado na Fig. (1). Além disso, a capacidade térmica efetiva (que incorpora a evolução do calor latente de sublimação) tende a uma distribuição delta de Dirac- δ e, consequentemente, não pode ser representada na região de pico por uma função suave, surgindo dificuldades para sua integração nessa região.

Para reduzir as instabilidades numéricas devidas à variação em degrau da entalpia durante a ablação, supõe-se que o material passa pela sublimação em uma faixa de temperatura entre $T_m - \Delta T/2$ e $T_m + \Delta T/2$ e com uma variação linear de entalpia com a temperatura.

$$H = \int_{T_i}^T c_{pa} dT, \text{ para } T_i \leq T < T_m - \frac{\Delta T}{2} \quad (2)$$

$$H = \int_{T_i}^{T_m - \Delta T/2} c_{pa} dT + \int_{T_m - \Delta T/2}^T \left(\frac{L}{\Delta T} \right) dT, \text{ para } T_m - \frac{\Delta T}{2} \leq T < T_m + \frac{\Delta T}{2} \quad (3)$$

$$H = \int_{T_i}^{T_m - \Delta T/2} c_{pa} dT + \int_{T_m - \Delta T/2}^{T_m + \Delta T/2} \left(\frac{L}{\Delta T} \right) dT + \int_{T_m + \Delta T/2}^T c_{pf} dT, \text{ para } T > T_m + \frac{\Delta T}{2} \quad (4)$$

onde : T_i é a temperatura inicial, T_m a temperatura de mudança de fase, L é o calor latente de mudança de fase e o ΔT é a faixa de temperatura de mudança de fase.

c_{pa} = calor específico do material ablativo,

c_{pf} = calor específico do material fictício.

Para a condutividade térmica, adota-se uma variação com a temperatura como apresentado na forma:

$$k = k_a, \text{ para } T_i \leq T < T_m - \frac{\Delta T}{2} \quad (5)$$

$$k = k_a + \int_{T_m - \Delta T / 2}^T \left(\frac{k_f - k_a}{\Delta T} \right) dT, \text{ para } T_m - \frac{\Delta T}{2} \leq T < T_m + \frac{\Delta T}{2} \quad (6)$$

$$k = k_f, \text{ para } T > T_m + \frac{\Delta T}{2} \quad (7)$$

onde os sub-índices a e f indicam, respectivamente, o material ablativo e o fictício.

Para implementar um procedimento implícito de integração numérica no tempo, substituiu-se a derivada em relação ao tempo na Eq (1), para obtenção da Eq. (8).

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \rho \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla \cdot [k \nabla T] \quad (8)$$

Cada elemento da malha, cuja união reconstitui o domínio, passa pelo processo de ablação tendo parte com material ablativo e parte com material fictício. Neste caso deve-se dar atenção especial ao método de avaliação da capacidade térmica efetiva deste elemento. Em cada ponto interno do domínio, o calor específico efetivo é avaliado por:

$$c_{pef} = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right) \quad (9)$$

Para que em cada passo de integração numérica no tempo, o calor específico efetivo capture o efeito do calor latente de sublimação, é adotado um esquema para sua avaliação:

$$C_{pef} = \frac{(H_n - H_{n-1})}{(T_n - T_{n-1})} \quad (10)$$

onde:

H_{n-1} = entalpia no instante $n + 1$ ou $(t + \Delta t)$

H^n = entalpia no instante n ou (t)

T_{n-1} = temperatura no instante $n - 1$ ou $(t - \Delta t)$

T^n = temperatura no instante n ou (t)

A condição de contorno para a Eq.(8) de fluxo de calor especificado é:

$$q_n(s_e) = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_e} \quad (11)$$

para a superfície externa (s_e) sujeita ao aquecimento aerodinâmico.

Enquanto que na superfície interna(s_i) a condição de contorno imposta é dada por:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_i} = 0 \quad (12)$$

onde n é a direção normal a superfície.

Na abordagem entálpica não é necessário fazer o rastreamento da superfície. Portanto, não é necessária a mudança de condições de contorno do período pré-ablativo para o período ablativo. Como a velocidade de desgaste da superfície em cada ponto não é calculada, há uma economia de tempo computacional, mas que é penalizado pela necessidade de ainda se calcular as temperaturas na região de material fictício. A vantagem da abordagem entálpica, por não ser necessário determinar a posição da superfície de ablação, torna-se mais importante em problemas bi e tridimensionais.

3. METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

Para a solução numérica do problema de ablação foi utilizada a abordagem entálpica, descrita anteriormente, juntamente com a aplicação do método de elementos finitos de Galerkin (formulação fraca) para a discretização no espaço.

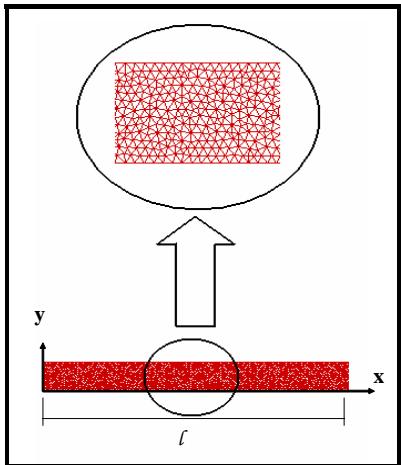


Fig. 2 - Malha computacional em um sólido semi-infinito na vertical

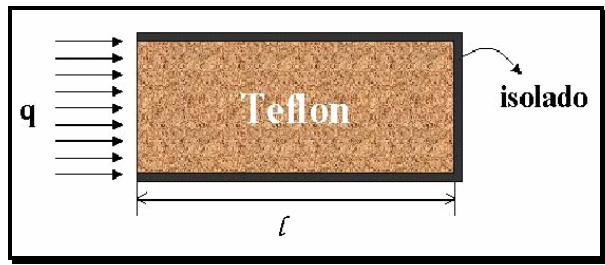


Fig. 3 - Representação esquemática do sistema de proteção térmica estudado.

Foi utilizada uma malha computacional não-estruturada com 3314 elementos triangulares e 1780 nós, aplicada a um domínio computacional bidimensional, cuja geometria é apresentada na Fig. (2). Para a integração no tempo foi adotado um procedimento totalmente implícito e iterativo. Assim pode-se capturar o efeito do calor latente de ablação durante o desgaste da superfície da proteção térmica e assegurar que a cada passo de tempo e, para todos os elementos que estão sofrendo ablação, seja utilizado um valor correto do “calor específico efetivo” e também da condutividade térmica. As integrais estabelecidas após a aplicação do método de elementos finitos foram calculadas utilizando a regra da quadratura Gaussiana com 79 pontos de Gauss internos a cada elemento do domínio.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizou-se como referência para comparação dos resultados obtidos a solução apresentada por Blackwell (1998), que simulou o desgaste de uma proteção térmica de teflon

empregando a abordagem de Stefan. Essa proteção térmica é esquematizada na Fig. (3) onde q é o fluxo de calor incidente.

Na simulação numérica foi imposto um fluxo de calor incidente $q = 2,84 \text{ MW/m}^2$ por um período de 4 segundos. As propriedades físicas do teflon e do material fictício são apresentadas na Tab (1). A condição inicial de temperatura foi admitida igual a $T_i = 298 \text{ K}$ em todos os nós do domínio físico.

Tab. 1 Propriedades físicas do teflon e do material queimado (fictício)

PROPRIEDADE	TEFLON	MATERIAL FICTÍCIO
Densidade	1922 [kg/m^3]	1922 [kg/m^3]
Condutividade térmica	0,22 [W/m K]	500 [W/m K]
Calor específico à pressão constante	1256 [J/kg K]	1256 [J/kg K]
Calor específico latente de sublimação	2326 [MJ/kg]	-
Temperatura de mudança de fase	833 [K]	-

As Figs. de (4) a (7) apresentam os resultados obtidos nas simulações numéricas comparados às soluções fornecidas por Blackwell (1998) para o fenômeno de desgaste na proteção térmica por ablação. As figuras em questão mostram a evolução temporal da solução do problema de ablação para três faixas de temperatura de mudança de fase (iguais a 3, 5 e 10K).

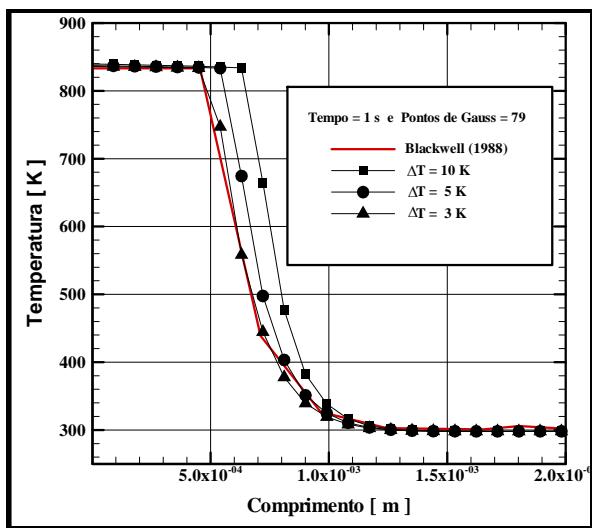


Fig. 4 – Perfis de temperatura ao longo do comprimento do molde para $t = 1 \text{ s}$ e 3 diferentes faixas de temperatura.

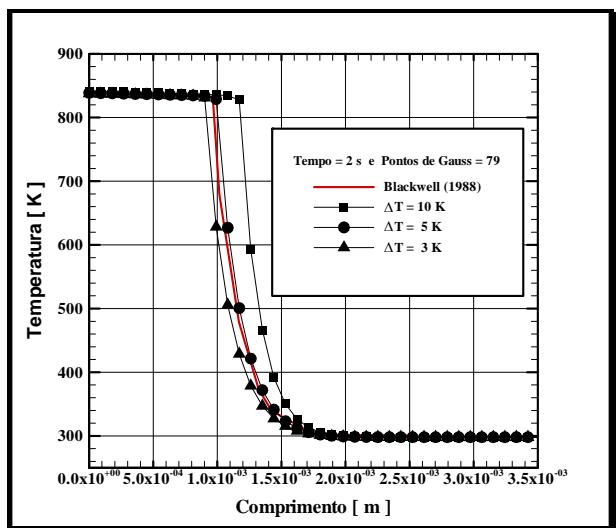


Fig. 5 - Perfis de temperatura ao longo do comprimento do molde para $t = 2 \text{ s}$ e 3 diferentes faixas de temperatura.

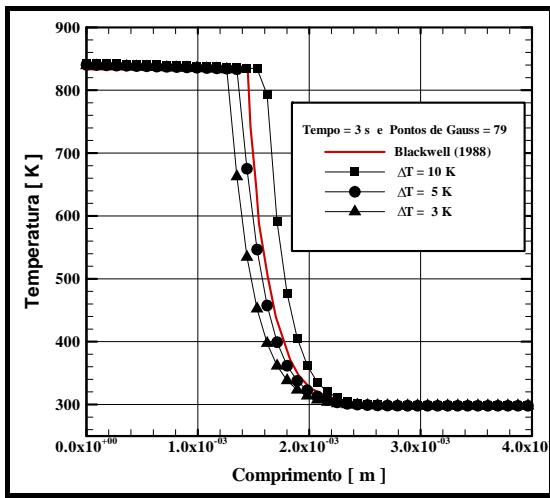


Fig. 6 - Perfis de temperatura ao longo do comprimento do molde para $t = 3$ s e 3 diferentes faixas de temperatura.

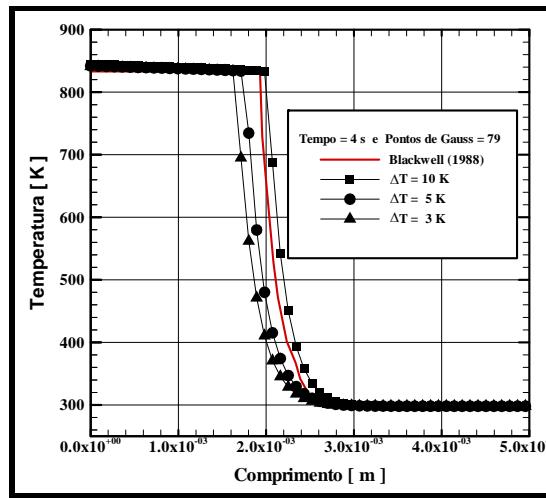


Fig. 7 - Perfis de temperatura ao longo do comprimento do molde para $t = 4$ s e 3 diferentes faixas de temperatura.

É possível observar, nas Figs. (4) a (7), o efeito causado pela diminuição da faixa de temperatura de mudança de fase na solução obtida pelo código computacional. Com a diminuição da faixa de temperatura de mudança de fase, a curva que representa a entalpia (vide Fig.(1)) adquire uma maior inclinação, fazendo com que a capacidade efetiva calculada nesta região seja majorada. Isto faz com que a frente de mudança de fase evolua mais lentamente para as situações cuja faixa de temperatura de mudança fase é mais estreita (capacidade efetiva maior), pois como o fluxo de calor na superfície externa é mantido constante, e como para uma capacidade térmica mais elevada exige-se uma maior quantidade de energia para ocorrer o fenômeno de ablação, então, espera-se que ocorra um atraso na frente de mudança de fase.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (processo nº 146405/1999-4) pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Biot, M. A.; Agrawal, H. C. , 1964, “Variational Analysis of Ablation for Variable Properties”. Journal of Heat Transfer, pp. 437-441.
- Blackwell , B. F., 1988, “Numerical Prediction of One-Dimensional Ablation Using a Finite Control Volume Procedure With Exponential Differencing”. Numerical Heat Transfer, v.14, pp. 17-34.
- Ferreira, M. V. C. , 2002, “Influência dos Métodos de Avaliação da Capacidade Térmica Efetiva nos Resultados da Simulação de Sistema Ablativo por Sublimação”. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos - SP.
- Leite, R. M. G. e Zaparoli, E. L., 1999, “Aplicação da Técnica de Elementos Finitos para a Solução de um Problema de Ablação Utilizando uma Abordagem Entálpica”. 15º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, SP, Brasil.
- Pantaleão, A. V. de Marco, F. C. G., Zaparoli, E. L., Ferreira, M. V. C., de Andrade, C. R. , 1999, “Influência da Técnica de Interpolação das Propriedades Térmicas na Abordagem Entálpica em Ablação”. 16º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil.

Storti, M. , 1995, "Numerical Modeling of Ablation Phenomena as Two-phase Stefan Problems". Int. J. Heat Mass Transfer, v. 38, n. 15, p 2843-2854.

Sutton, G. W. ,1982, "The Initial of Ablation Heat Protection an Historical Perspective". Journal and Spacecraft and Rockets, v.19, nº 2, p .3-11.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

2-DIMENSIONAL ANALYSIS OF ABLATIVE THERMAL PROTECTION

Aluisio Viais Pantaleão

aluisio@mec.ita.br

Cláudia Regina de Andrade

claudia@mec.ita.br

Edson Luiz Zaparoli

zaparoli@mec.ita.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Departamento de Energia – IEME
Pça Marechal Eduardo Gomes, 50 - 12228-900 - São José dos Campos, SP, Brasil

Abstract. This work presents the analysis of ablation thermal protection employing the enthalpy approach for phase change in two-dimensional problems. For the numerical solution, the space discretization was made using the Galerkin finite elements method with an implicit and iterative procedure in time, to capture the effect of the ablation latent heat during the thermal protection surface consumption. Finally, the results were compared with the specific literature obtaining a good agreement.

Keyword: Enthalpy Method, Finites Elements, Thermal Protection, Ablation