

## **ESCOAMENTO LAMINAR DE JATO IMPINGENTE SOBRE CAMADA POROSA COM NÃO EQUILÍBRIO TÉRMICO. PARTE 2. EFEITO DA RAZÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SÓLIDO PELA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FLUIDO.**

Felipe Tannús Dórea, [dorea@ita.br](mailto:dorea@ita.br)<sup>1</sup>  
Marcelo J. S. de Lemos, [delemos@ita.br](mailto:delemos@ita.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Energia – IEME  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA  
12228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil

*Resumo: O presente trabalho visa avaliar a influência da razão de condutividade térmica do sólido pela condutividade térmica do fluido no modelo de transferência de calor utilizado para simular numericamente o escoamento de um jato impingente sobre uma camada porosa, em que o jato está a uma temperatura diferente da camada porosa. Foram avaliados dois modelos de transferência de calor: O modelo de uma equação de energia em que se considera o equilíbrio térmico local, ou seja, as duas fases estão em equilíbrio e portanto não há troca de calor entre elas, e o modelo de duas equações de energia em que se considera o não equilíbrio térmico local, ou seja, as duas fases tem temperaturas diferentes e portanto trocam calor entre si. Os modelos foram avaliados em base a dois parâmetros: O número de Nusselt ao longo da placa de incidência e a razão  $q_w^\phi/q_w$  que pode ser avaliada como uma medida da efetividade do uso da camada porosa para o aumento da transferência de calor total pela parede de incidência. Foi observado que a camada porosa neutraliza os gradientes de temperatura na região de incidência e atenua o decaimento na distribuição local do número de Nusselt, essa característica pode ser desejada em muitas aplicações tecnológicas em que não se deseja grandes variações no gradiente de temperatura na região de incidência e através da relação  $q_w^\phi/q_w$  observa-se para quais características da camada porosa obtém-se um aumento no fluxo de calor total que sai da placa de incidência.*

*Palavras-chave: Jato Impingente, Não equilíbrio térmico, Efeito da relação  $k_s/k_f$ , Meio Poroso.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Jatos impingentes são comumente utilizados em aplicações industriais em que se tem como objetivo um grande aquecimento, resfriamento ou em processos que se deseja uma grande transferência de calor e massa como, por exemplo, nos processos de secagem. A principal vantagem do uso de jatos impingentes é a possibilidade de se obter uma alta transferência de calor e massa localizadas devido a fina espessura das camadas limite térmica e fluidodinâmica na região de estagnação.

Estudos pioneiros considerando jatos impingentes bi-dimensionais foram apresentados por Gardon e Akfirat (1966), que obtiveram experimentalmente os coeficientes locais e médios de transferência de calor por convecção. Chen et al. (2000) experimentalmente e numericamente analisaram a transferência de calor e massa induzida por um jato laminar bi-dimensional. Chiriac e Ortega (2002) realizaram simulações numéricas em regime transitório e permanente para o escoamento bi-dimensional de um jato incidente sobre uma placa plana a temperatura constante. Para o caso específico aqui investigado, do escoamento de um jato incidente sobre uma camada porosa, Prakash et al. (2001a) simularam numericamente o escoamento de jatos circulares impingentes em canais cilíndricos com e sem a presença de uma camada porosa. Prakash et al. (2001b) realizaram medidas experimentais utilizando velocimetria a laser por efeito Doppler (LDV) do escoamento de jatos circulares impingentes em canais cilíndricos com e sem a presença de uma camada porosa. Fu e Huang (1997) calcularam a eficiência térmica de diferentes camadas porosas sob o escoamento de um jato incidente e Jeng e Tzeng (2005) estudaram a eficiência térmica e hidrodinâmica de um jato incidente sobre uma esponja metálica. Recentemente Graminho e de-Lemos (2008) investigaram a estrutura do escoamento de um jato laminar incidindo sobre uma camada porosa e de-Lemos e Fischer (2008) estudaram a transferência de calor de um jato impingente laminar sobre uma camada porosa utilizando o modelo de Equilíbrio Térmico Local (LTE) em que se considera que as fases fluida e sólida estão em equilíbrio térmico e, portanto não trocam calor entre si. No Trabalho de de-Lemos e Dórea (2010a) foi investigado o efeito da porosidade e do modelo de transferência de calor utilizado, no

escoamento de um jato impingente sobre uma camada porosa em que o jato está a uma temperatura diferente da superfície de incidência, simulado com dois modelos diferentes de transferência de calor e em Dórea e de-lemos (2010b) foi avaliado o efeito da espessura da camada porosa para o mesmo escoamento de Dórea e de-lemos (2010a).

O objetivo da presente contribuição é de estender a investigação de de-lemos e Dórea (2010a) e Dórea e de-lemos (2010b) para avaliar o efeito da relação de condutividade térmica do sólido sobre o fluido  $k_s/k_f$  no modelo de energia utilizado para o escoamento laminar não isotérmico de um jato incidente sobre uma camada porosa.

## 2. DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA

A geometria e a nomenclatura analisadas são apresentadas na Fig.1. Um jato laminar com um perfil de velocidade uniforme ou completamente desenvolvido  $v_o$  e com uma temperatura constante  $T_o$  sai do bico ejetor e entra no canal com altura  $H$  e comprimento  $2L$  com a forma de duas placas paralelas. O jato incide perpendicularmente contra a placa inferior do canal caracterizando um jato impingente confinado bi-dimensional. A largura do bico ejetor é  $B$  e a distância entre o bico e a placa de incidência é  $H$ . A placa inferior está à temperatura  $T_1$  que é mantida constante 10K acima da temperatura do jato  $T_o$ . A placa inferior está coberta com uma camada de material poroso de espessura  $h$ .

O escoamento é assumido como bi-dimensional, laminar, incompressível e em regime permanente. O meio poroso é assumido como homogêneo, rígido e inerte. As propriedades do fluido são constantes e os efeitos da gravidade não são considerados.

As condições de contorno do problema são: Perfil de velocidade constante ou completamente desenvolvido e temperatura de entrada do jato constante; condições de não escorregamento nas paredes; condição de simetria em  $x=0$ ; perfil de velocidade e temperatura completamente desenvolvido na saída do canal ( $x=L$ ); na placa inferior ( $y=H$ ) é assumida condição de temperatura constante; na superfície superior, para  $B/2 < x \leq L$ , condição de fluxo de calor nulo é assumida.

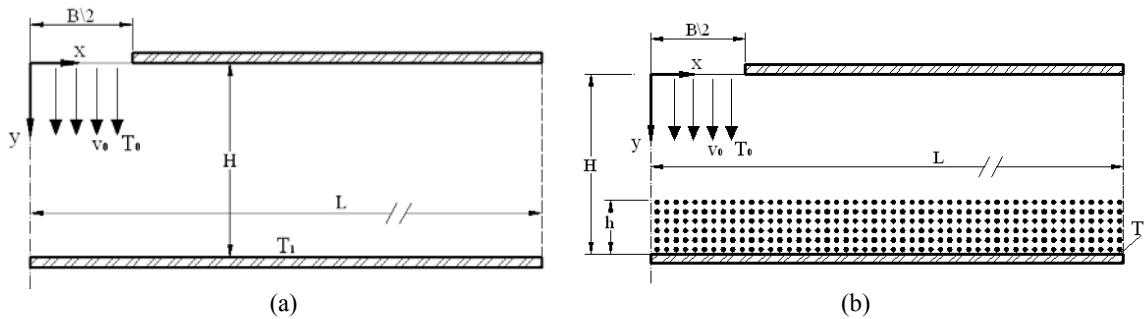


Figura 1 – Geometrias Analisadas (a) meio limpo (b) meio poroso

## 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a solução numérica do escoamento em meios porosos, uma série de conceitos pertinentes ao problema serão apresentados, como a média volumétrica intrínseca, flutuação espacial, teorema da média volumétrica local, as equações de conservação macroscópicas e o conceito da dupla decomposição, esses conceitos são apresentados com mais detalhes nos trabalhos de Pedras e de-Lemos (2000a) e Pedras e de-Lemos (2000b) e Dórea e de-Lemos (2010b).

Para o escoamento em meio poroso, o princípio da continuidade e a equação macroscópica da conservação da quantidade de movimento são dadas por:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_D = 0 \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot \frac{\mathbf{u}_D \mathbf{u}_D}{\phi} = -\nabla \phi \langle p \rangle^i + \mu \nabla^2 \mathbf{u}_D - \left[ \frac{\mu \phi}{K} \mathbf{u}_D + \frac{c_f \phi \rho}{\sqrt{K}} |\mathbf{u}_D| \mathbf{u}_D \right] \quad (2)$$

Estas equações são válidas para o meio limpo e poroso, em que  $\langle p \rangle^i$  é a média intrínseca da pressão no fluido,  $u_D$  é a média da velocidade superficial ou velocidade de Darcy,  $x$  e  $y$  são as coordenadas cartesianas,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\phi$  é a porosidade do meio poroso e  $K$  é a permeabilidade do meio poroso é calculada segundo a relação de Ergun, dada por, mais detalhes em Saito e de-Lemos (2005):

$$K = \frac{dp^2 \phi^3}{144(1-\phi)^2} \quad (3)$$

em que,  $\phi$  é a porosidade do meio e  $d_p$  é o diâmetro da partícula que compõe o meio poroso. O número de Darcy,  $Da$  é definido pela razão  $Da = K / H^2$ .

A Eq. (1) é a conservação da massa e a Eq. (2) representa a conservação da quantidade de movimento. O terceiro e quarto termos do lado direito da Eq. (2) são a velocidade de Darcy e termo de Forchheimer, respectivamente.

As equações macroscópicas de energia para o escoamento laminar em um meio poroso, utilizando a consideração de não equilíbrio térmico local, mais detalhes no trabalho de Saito e de Lemos (2005) e Dórea e de-Lemos (2010b), é dada por:

$$(\rho c_p)_f \nabla \cdot (\mathbf{u}_D \langle T_f \rangle^i) = \nabla \cdot \{ \mathbf{K}_{eff,f} \cdot \nabla \langle T_f \rangle^i \} + h_i a_i (\langle T_s \rangle^i - \langle T_f \rangle^i) \quad (4)$$

$$0 = \nabla \cdot \{ \mathbf{K}_{eff,s} \cdot \nabla \langle T_s \rangle^i \} - h_i a_i (\langle T_s \rangle^i - \langle T_f \rangle^i) \quad (5)$$

em que  $\mathbf{K}_{eff,f}$  e  $\mathbf{K}_{eff,s}$  são respectivamente o tensor condutividade efetiva do fluido e do sólido, dado por:

$$\mathbf{K}_{eff,f} = [\phi k_f] \mathbf{I} + \mathbf{K}_{disp} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{eff,s} = [(1 - \phi) k_s] \mathbf{I} \quad (7)$$

e  $\mathbf{I}$  é o tensor unitário,  $c_p$  é o calor específico do fluido,  $T_f$  e  $T_s$  são respectivamente a temperatura do fluido e do sólido e  $\mathbf{u}$  é a velocidade do escoamento,  $A_i$  é a área interfacial no interior do REV e  $\mathbf{n}_i$  é um vetor normal a interface fluido-sólida,  $a_i = A_i / \nabla V$  é a área interfacial por unidade de volume.

#### Parâmetros Adimensionais:

O número de Nusselt é calculado para as fases fluida e sólida em analogia com Vafai e Alazmi (2000):

Número de Nusselt para a fase fluida:

$$Nu_f = \frac{H}{T_1 - T_0} \left( \frac{\partial \langle T_f \rangle^i}{\partial y} \right) \quad (8)$$

Número de Nusselt para a fase sólida:

$$Nu_s = \frac{H}{T_1 - T_0} \left( \frac{\partial \langle T_s \rangle^i}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Para comparações com o número de Nusselt para o modelo de uma equação de energia como utilizado em de-Lemos e Fischer (2008), definido como:

$$Nu = \frac{H}{T_1 - T_0} \left( \frac{\partial \langle T \rangle^i}{\partial y} \right) \quad (10)$$

em que a consideração de equilíbrio térmico local faz com que:  $\langle T \rangle^i = \langle T_s \rangle^i = \langle T_f \rangle^i$

#### Fluxo de calor integral calculado com os diferentes modelos:

A transferência de calor integral da parede inferior pode ser calculada para as duas configurações apresentadas na Figura 1, assim:

$$q_w = \frac{1}{L} \int_0^L q_{wx}(x) dx \quad (11)$$

De acordo com o modelo de energia utilizado, existem duas possibilidades para a transferência de calor local  $q_{wx}$ . Pode-se utilizar a hipótese de equilíbrio térmico local (LTE), ou então, a transferência de calor local de cada fase pode ser calculada separadamente, para se calcular o calor transferido a partir da parede de incidência. No segundo caso, a consideração de Não Equilíbrio Térmico é aplicada:

Para o modelo de uma equação de energia:

$$q_w = \frac{1}{L} \int_0^L q_{wx}(x) dx; \quad q_{wx} = -k_{eff} \frac{\partial \langle T \rangle^i}{\partial y} \Big|_{y=H}; \quad k_{eff} = \phi k_f + (1 - \phi) k_s \quad (12)$$

Para o modelo de duas equações de energia:

$$q_w = \frac{1}{L} \int_0^L q_{wx}(x) dx; \quad q_{wx} = -k_{eff,f} \frac{\partial \langle T_f \rangle^i}{\partial y} \Big|_{y=H} - k_{eff,s} \frac{\partial \langle T_s \rangle^i}{\partial y} \Big|_{y=H}; \quad \begin{cases} k_{eff,f} = \phi k_f \\ k_{eff,s} = (1 - \phi) k_s \end{cases} \quad (13)$$

Para os casos em que a camada porosa é considerada, o fluxo de calor na parede é dado por um sobrescrito  $\phi$  na forma  $q_w^\phi$ . A razão  $q_w^\phi/q_w$  pode ser avaliada como uma medida da efetividade do uso da camada porosa para o aumento da transferência de calor total pela parede de incidência.

#### 4. METODO NUMÉRICO

As equações (1), (2), (4) e (5) representam a interface e as condições de contorno que foram discretizadas em um volume de controle que engloba ambos os meios limpo e poroso. As equações discretizadas usam o sistema de coordenadas generalizadas. O método numérico empregado para discretização das equações governantes é o método de volumes finitos com arranjo co-localizado. Um esquema híbrido, que utiliza o esquema Upwind, Upwind Differencing Scheme, e o esquema de diferenças centradas, Central Differencing Scheme - CDS são usados para interpolação dos fluxos convectivos. O algoritmo SIMPLE é utilizado para o acoplamento pressão-velocidade e a equação da quantidade de movimento pelo algoritmo SIP (Strongly Implicit Procedure).

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A validação do código e da malha estão demonstradas em Dórea e de-Lemos (2010b). Em todas as simulações numéricas foi utilizada uma malha de 40 x 180 (7200 nós), refinada próxima à parede. A validação do código e da malha para o meio limpo foram realizadas comparando os resultados obtidos com a literatura para duas diferentes configurações. A figura abaixo ilustra a malha utilizada.

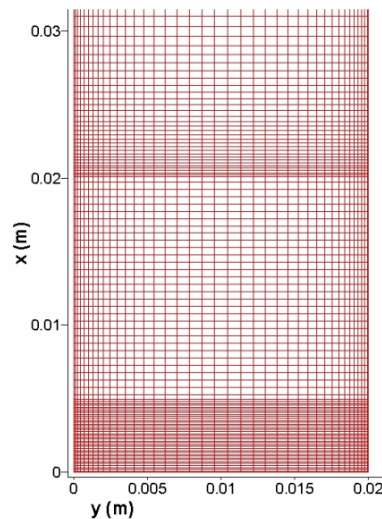


Figura 2 – Parte da malha utilizada com 7200 nós para  $H/B = 2$

Todos os resultados foram simulados com as seguintes configurações geométricas e condições de contorno: perfil uniforme de velocidade e temperatura; temperatura de entrada do jato  $T_1 = 300K$ ; a temperatura da placa inferior é mantida constante e igual a  $T_o = 300K$ ; a razão entre o espaçamento entre o bico ejetor e a placa de incidência e a largura do bico ejetor é mantida constante e igual a  $H/B = 2$ ; a largura do bico ejetor é  $B = 1 \times 10^{-03}m$ .

As Figuras 3, 4 e 5 respectivamente, mostram as linhas de corrente, os perfis de temperatura do fluido e do sólido para várias relações de condutividade térmica do sólido pelo fluido  $k_s/k_f$ .

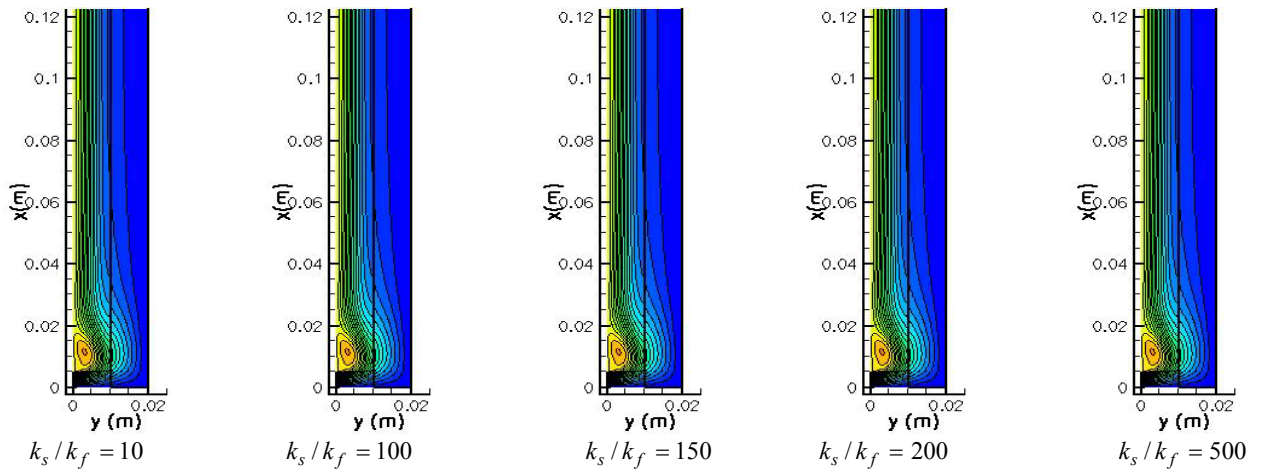


Figura 3 – Linhas de corrente para a camada porosa com várias relações de condutividade térmica  $k_s/k_f$  e com  $Re=750$ ,

$H/B = 2$ ,  $h/H = 0.50$ ,  $Da = 8.28 \times 10^{-3}$  e  $\phi = 0.9$

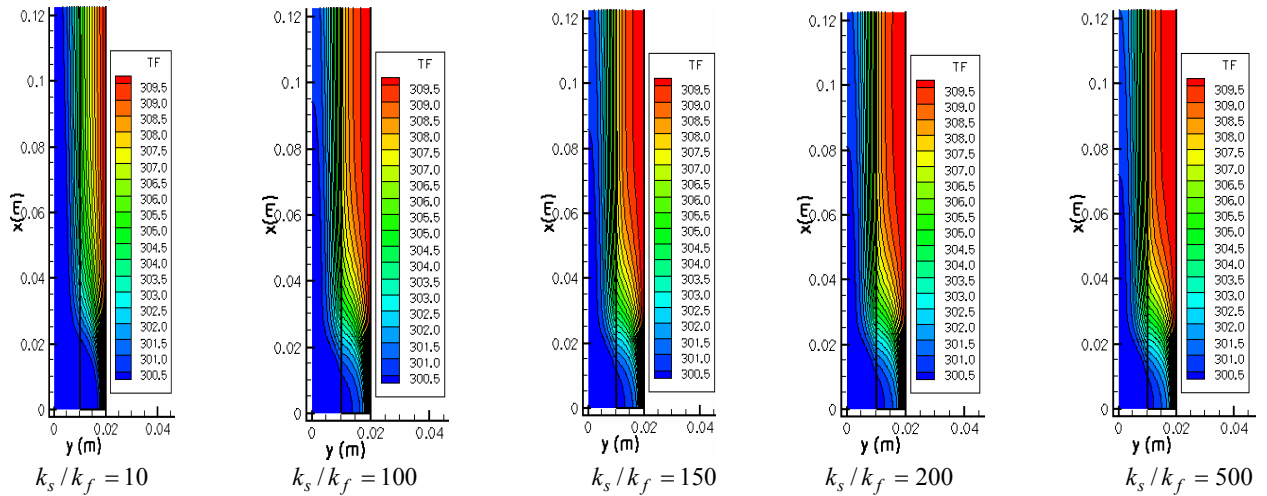


Figura 4 – Campos de distribuição da temperatura do fluido para várias razões de condutividade térmica  $k_s/k_f$  com

$Re=750$ ,  $H/B = 2$ ,  $h/H = 0.50$ ,  $Da = 8.28 \times 10^{-3}$  e  $\phi = 0.9$

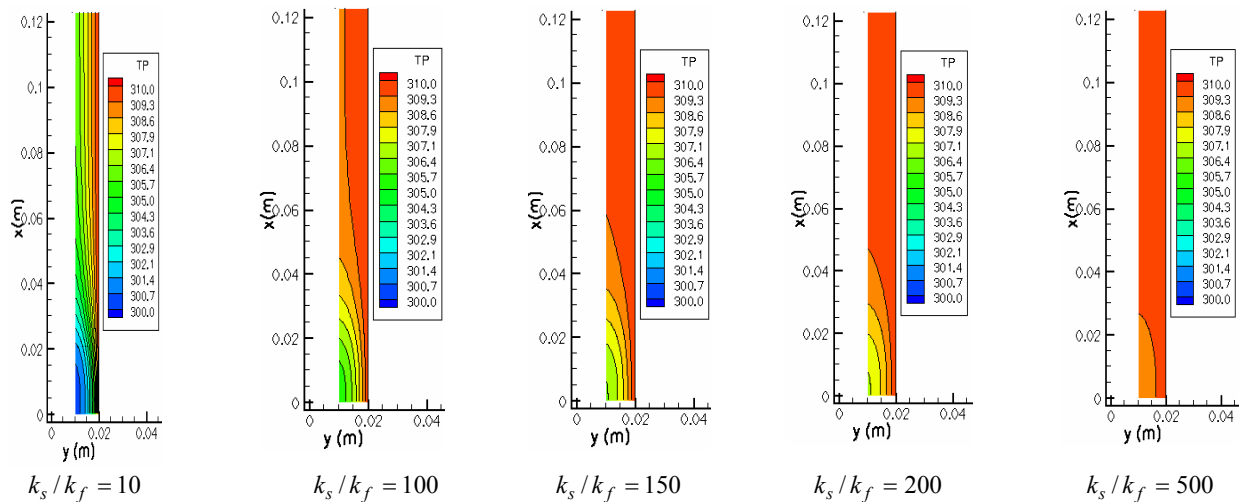


Figura 5 – Campos de distribuição da temperatura do sólido para várias razões de condutividade térmica do sólido pelo fluido com  $Re=750$ ,  $H/B = 2$ ,  $h/H = 0.50$ ,  $Da = 8.28 \times 10^{-3}$  e  $\phi = 0.9$

As linhas de corrente apresentadas na Figura 3 indicam que a variação da relação  $k_s/k_f$  não influencia o comportamento do escoamento, uma vez que foi utilizada uma solução desacoplada, ou seja, o campo térmico foi resolvido utilizando propriedades constantes e os efeitos de convecção natural não foram considerados. Os campos de temperatura das fases fluida e sólida estão plotados nas Figuras 4 e 5 respectivamente. Para casos em que a relação de condutividade térmica  $k_s/k_f$  é alta os gradientes de temperatura das fases fluida e sólida diminuem, já que com uma maior condutividade térmica do sólido maior é a transferência de calor da parede para a camada porosa que conseqüentemente transfere calor para o fluido através da transferência de calor interfacial. As Figuras 6 e 7 mostram respectivamente a distribuição do número de Nusselt para as fases fluida e sólida e confirmam a tendência apresentada nos mapas bi-dimensionais de distribuição de temperatura, quanto maior é a relação de condutividade térmica  $k_s/k_f$  menores são os gradientes de temperatura. A figura 8 mostra o efeito da relação  $k_s/k_f$  e do modelo de energia utilizado na distribuição do número de Nusselt. É observado que para baixas relações  $k_s/k_f$  resultados similares são obtidos com os modelos de uma e duas equações de energia já que para baixas relações de  $k_s/k_f$  os valores dos perfis de temperatura das fases fluida e sólida são da mesma ordem e para esses casos a hipótese de equilíbrio térmico local é mais realística. Para altas relações de  $k_s/k_f$  os perfis de temperatura são substancialmente diferentes (ver Figuras 4 e 5) uma vez que ocorre um maior transporte de calor através do sólido que constitui a camada porosa afetando os gradientes de temperatura das fases fluida e sólida na parede, especialmente no ponto de estagnação.

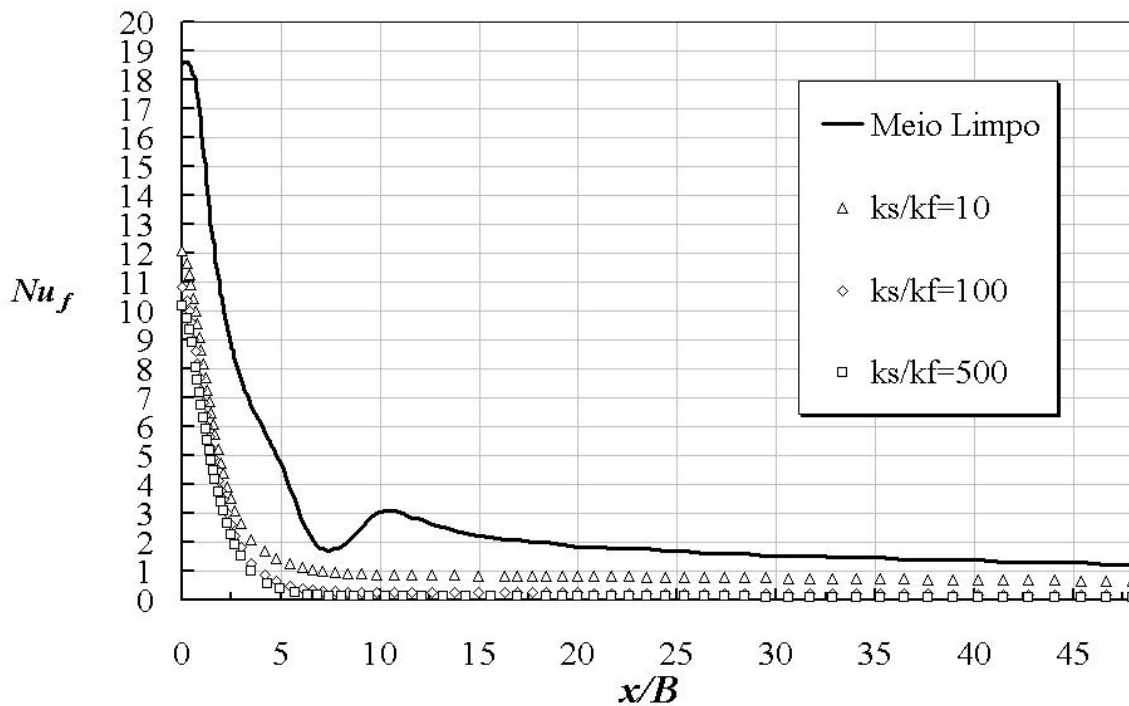


Figura 6 – Distribuição do número de Nusselt para a fase fluida para várias relações de  $k_s/k_f$ , com  $Re=750$ ,  $H/B=2$ ,  $h=0.5H$ ,  $Da=8.28 \times 10^{-3}$ ,  $\phi=0.9$ .

A Fig. 6 mostra que quanto maior é a relação  $k_s/k_f$ , menor é o número de Nusselt da fase fluida, já que quanto maior a relação  $k_s/k_f$  mais intensa será a troca de calor entre as fases e, portanto menores serão os gradientes na placa de incidência.

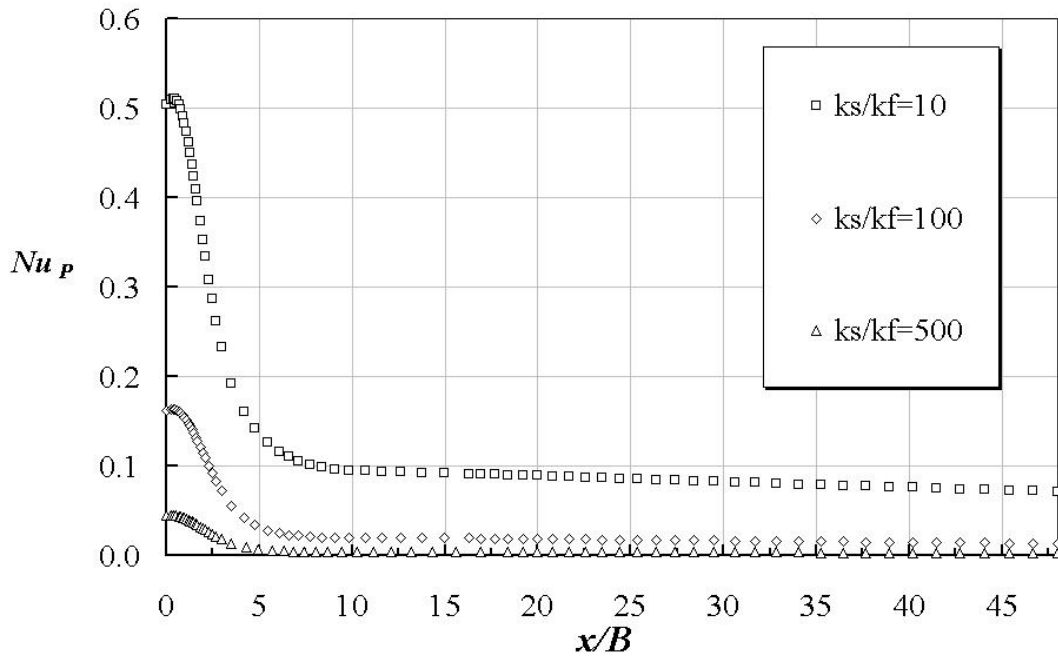


Figura 7 – Distribuição do número de Nusselt da fase sólida para várias relações de  $k_s/k_f$ , com  $Re=750$ ,  $H/B=2$ ,  $h=0.5H$ ,  $Da=8.28 \times 10^{-3}$ ,  $\phi=0.9$ .

As Figs. 6 e 7 mostram respectivamente que quanto maior é a relação  $k_s/k_f$ , menores são os números de Nusselt das fases fluida e sólida, já que quanto maior a relação  $k_s/k_f$  mais intensa é a troca de calor entre as fases e portanto menores serão os gradientes na placa de incidência, esta tendência é confirmada pela Fig. 8 que mostra que os gradientes diminuem quando a relação  $k_s/k_f$  aumenta, para a simulação com os dois modelos de energia.

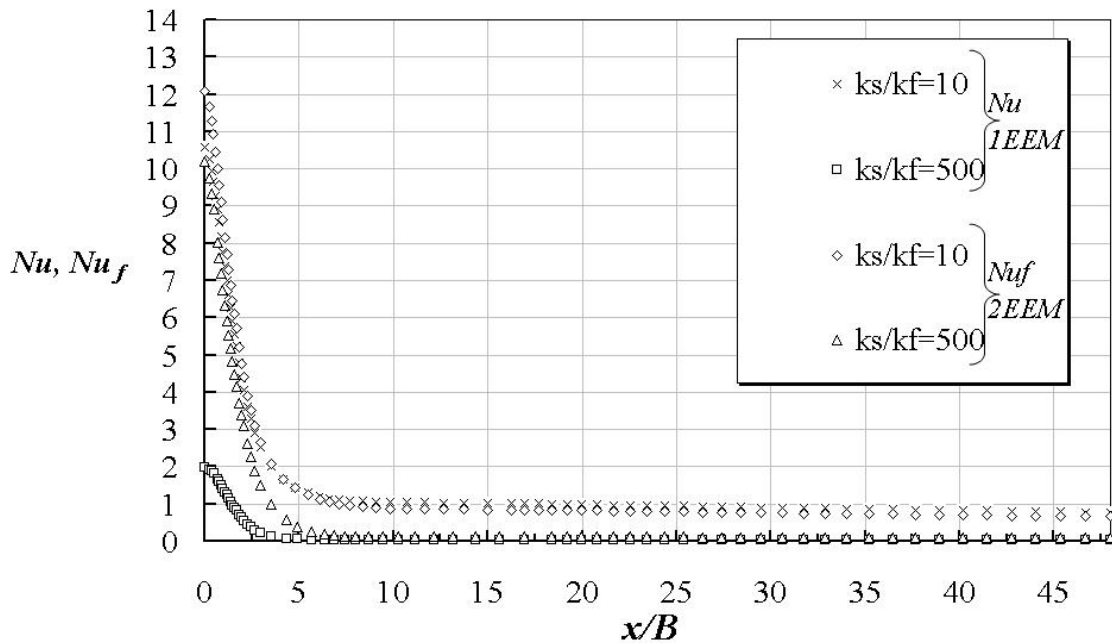


Figura 8 – Distribuição Local do número de Nusselt em função do modelo de energia para várias relações de  $k_s/k_f$ , com  $Re=750$ ,  $H/B=2$ ,  $h=0.5H$ ,  $Da=8.28 \times 10^{-3}$ ,  $\phi=0.9$ .

A Fig. 8 mostra a comparação do número de Nusselt calculado com o modelo de uma e duas equações de energia respectivamente, observa-se que os modelos apresentam comportamento similar quando a relação  $k_s/k_f = 10$  e se distanciam quando a relação  $k_s/k_f = 500$ , o que ocorre já que quanto maior a relação a relação  $k_s/k_f$  maior é a troca de calor entre as fases e maior é o não equilíbrio térmico local, portanto quanto maior é a relação  $k_s/k_f$  menos representativo é o modelo de uma equação de energia e maior é a diferença entre os números de Nusselt calculados com os modelos de uma e duas equações de energia.

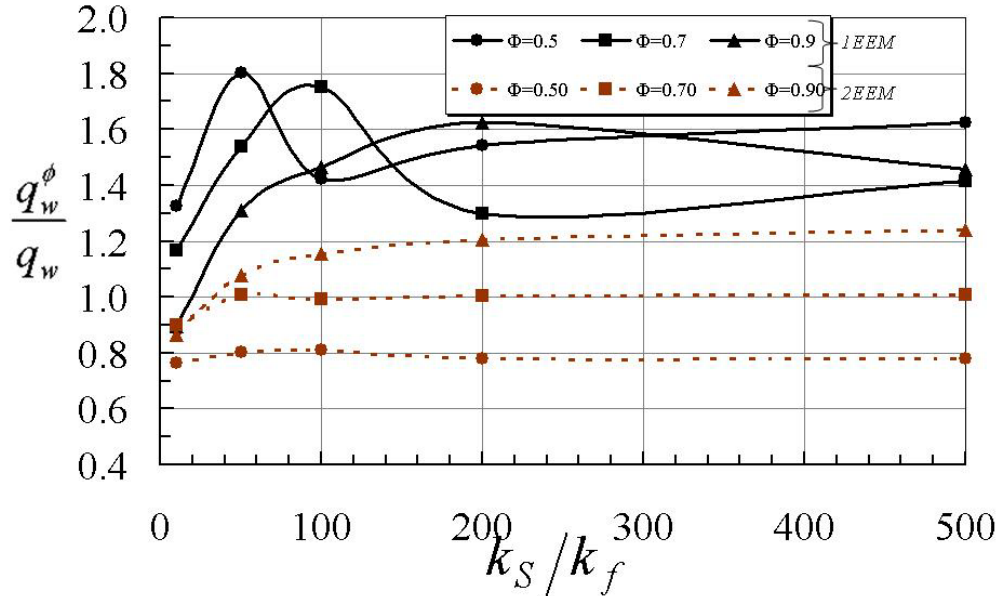


Figura 9 – Comparação do Modelo de uma e duas equações de energia para várias relações de Condutividade térmica do sólido pela condutividade térmica do fluido  $k_s/k_f$ , para  $Re=750$ ,  $H/B = 2$  e  $Da = 8.28 \times 10^{-3}$ .

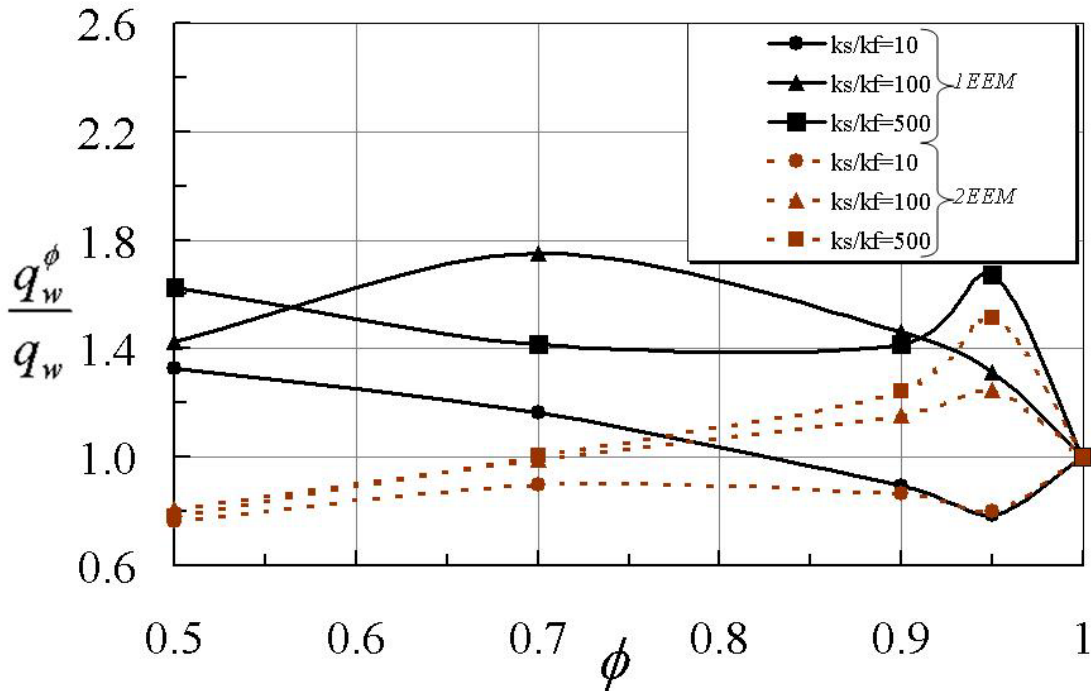


Figura 10 – Comparação do Modelo de uma e duas equações de energia para várias relações de Condutividade térmica do sólido pela condutividade térmica do fluido  $k_s/k_f$ , para  $Re=750$ ,  $H/B = 2$  e  $Da = 8.28 \times 10^{-3}$ .



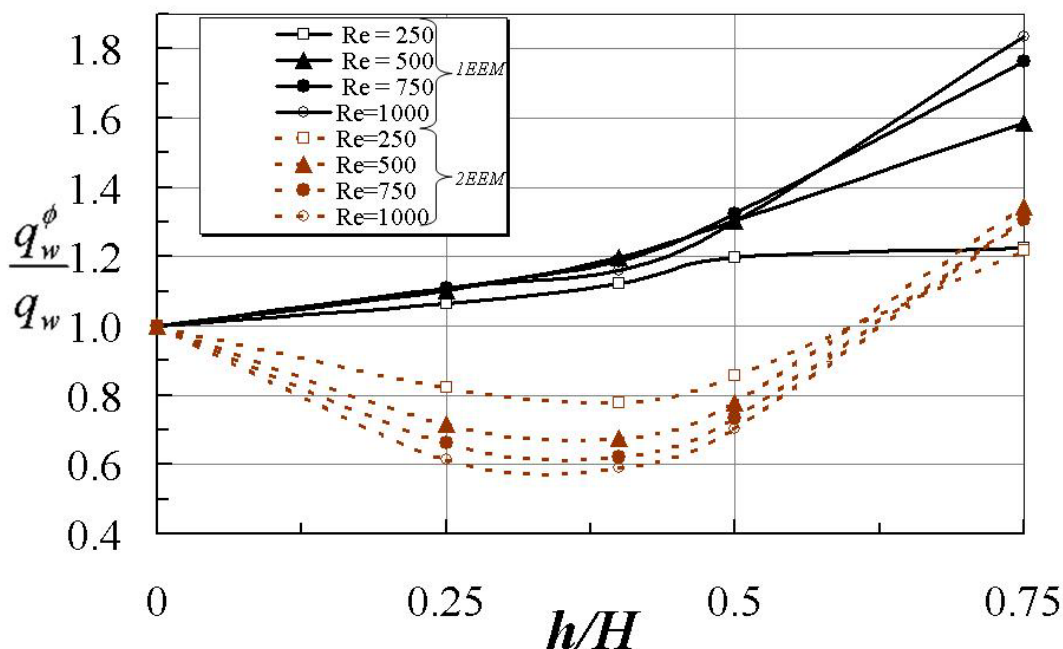


Figura 11 – Comparação do modelo de uma e duas equações de energia para várias espessuras da camada porosa com  $H/B = 2$ ,  $Da = 8.28 \times 10^{-3}$  e  $\phi = 0.5$

A Fig. 9 mostra que o modelo de uma equação de energia superestimou o calor extraído da camada porosa para toda a faixa da relação  $k_s/k_f$  de 0 a 500, para  $k_s/k_f = 10$  e  $\phi = 0.9$  os resultados dos dois modelos foram similares, e a quantidade de calor extraída da camada porosa sofre oscilações em toda a faixa de  $k_s/k_f$  com o modelo de uma equação, enquanto que com o modelo de duas equações a quantidade de calor extraído da placa aumenta com o aumento dessa relação.

A Fig. 10 mostra que os resultados obtidos com o modelo de duas equações de energia tiveram uma boa concordância com o modelo de uma equação de energia para porosidades maiores que  $\phi = 0.9$ , para porosidades  $0.5 > \phi > 0.9$  o modelo de uma equação de energia superestimou o fluxo de calor que sai da camada porosa isto ocorre já que para pequenas porosidades a quantidade de material sólido é grande e, portanto a troca de calor entre as fases fluida e sólida é relevante por isso a consideração de equilíbrio térmico não é pertinente e o modelo não é representativo, este comportamento corrobora com os resultados encontrados em de-Lemos e Dórea (2010a) em que foi observado que o comportamento do modelo de uma equação de energia é similar ao modelo de duas equações de energia para o número de Nusselt ao longo da placa de incidência para grandes porosidades.

A Fig. 11 mostra que o modelo de uma equação de energia superestimou o fluxo de calor que sai da camada porosa para todas as espessuras de camada porosa com  $H/B = 2$ ,  $Da = 8.28 \times 10^{-3}$  e  $\phi = 0.5$  assim como demonstrado em Dórea e de-Lemos (2010b) para  $\phi = 0.9$ , quanto maior é o número de Reynolds maior é a diferença obtida entre os modelos, uma vez que quanto maior é este parâmetro menos realístico é a consideração de equilíbrio térmico.

## 6. CONCLUSÕES

Através das análises realizadas observa-se que quanto maior é a relação  $k_s/k_f$  menores são os gradientes de temperatura na placa de incidência para as fases fluida e sólida já que quanto maior é essa relação maior é a troca de calor entre as fases, o que justifica a grande discrepância obtida quando se compara os modelos de uma e duas equações para altas relações de  $k_s/k_f$ .

Na comparação dos dois modelos quanto ao fluxo de calor que sai da camada porosa observa-se que o modelo de uma equação de energia superestima o fluxo de calor que sai da camada porosa para todos os casos analisados, entretanto para quando se tem grandes porosidades o modelo de uma equação aproxima do modelo de duas equações, como foi observado também em de-Lemos e Dórea (2010a) o que se justifica uma vez que para grandes porosidades a quantidade de material sólido existente é pequena portanto sua influência na troca de calor entre as fases também é pequena e a consideração de equilíbrio térmico local é pertinente.

A utilização de uma camada porosa sobre a placa de incidência é positiva uma vez que a camada porosa diminui os gradientes de temperatura na região de incidência especialmente quando se tem altas relações de  $k_s/k_f$ , do ponto de vista do calor extraído da placa a utilização de uma camada porosa é positiva para a camada porosa com as seguintes

características: espessura da camada porosa ocupando mais que 60% do canal e porosidades maiores que 0,9, ou seja, um meio poroso em que 90% é constituído por vazios e apenas 10% é constituído por material sólido, essas configurações foram obtidas, pois foram as que a relação  $q_w^{\phi}/q_w$  é maior que 1, ou seja nessas condições o calor extraído com uma camada porosa é maior que o calor extraído com o meio limpo.

## 7. AGRADECIMENTOS

À Capes pelo suporte financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído nesse artigo.

## 9. REFERÊNCIAS

- Alazmi, B., Vafai, K., "Analysis of variants within the porous media transport models", *Journal of Heat Transfer*, 122 (2000) 303-326.
- Chen, M., Chalupa, R., West, A.C. and Modi, V., (2000). "High Schmidt Mass Transfer in a Laminar Impinging Slot Jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.43, pp. 3907-3915.
- Chiriac, V.A. and Ortega, A., (2002), "A Numerical Study of the Unsteady Flow and Heat Transfer in a Transitional Confined Slot Jet Impinging on an Isothermal Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45, pp. 1237-1248.
- de Lemos, M.J.S. and Pedras, M.H.J., (2000a), "Simulation of Turbulent Flow Through Hybrid Porous Medium-Clear Fluid Domains", *Proc. of IMECE2000-ASME-Intern. Mech. Eng. Congr.*, ASME-HTD-366-5, pp. 113-122, ISBN: 0-7918-1980-6, Orlando, Florida, November 5-10.
- de Lemos, M.J.S. and Pedras, M.H.J., (2000b), "Modeling Turbulence Phenomena in Incompressible Flow Through Saturated Porous Media", *Proc. of 34th ASME-National Transfer Conference (on CD-ROM)*, ASME-HTD-1463CD, Paper NHTC2000-12120, ISBN: 0-7918-1997-3, Pittsburgh, Pennsylvania, August 20-22.
- de Lemos, M.J.S., Fischer, C., "Thermal Analysis of an Impinging Jet on a Plate with and without a Porous Layer", *Numerical Heat Transfer, Part A*, 54:1022-1041.(2008)
- de Lemos, M.J.S., Dórea, F.T., (2010a) "Laminar Heat Transfer on a wall covered with a layer of Porous Material simulated with a Two-Energy equation Model", *Proceedings of the International heat Transfer Conference*, Paper IHTC14-22130, Washington, DC, USA, August 8-13.
- Dórea, F. T., de Lemos, M.J.S., (2010b) "Escoamento Laminar de Jato Impingente sobre camada porosa com Não-Equilíbrio térmico. Parte 1. Efeito da Espessura da Camada Porosa", *Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Artigo : CON10-0041, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 18-21 de Agosto.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 4ª edição, editora LTC, (1998).
- Fu, W.-S. and Huang, H.,-C, 1997. "Thermal performance of different shape porous blocks under an impinging jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 10, pp. 2261-2272.
- Gardon, R. and Akfirat, J.C., (1966) "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets", *Journal of Heat Transfer*, Vol.101, pp. 101-108.
- Graminho, Daniel Rezende ; de-lemos MJS . Laminar Confined Impinging Jet into a Porous Layer. *Numerical Heat Transfer. Part A, Applications*, v. 54, p. 151-177, 2008
- Incropera, F.P., De Witt, D.P., "Transferência de Calor e de Massa", 5ª edição, editora LTC, (2003).
- Jeng, T.-Z. and Tzeng, S.-C., 2005. "Numerical Study of Confined Slot Jet Impinging on Porous Metallic Foam Heat Sink", *International Journal of Heat and Transfer*, Vol.48, pp. 4685-4694.
- Patankar, S.V., (1980). "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, New York
- Prakash, M., Turan, F.O., Li, Y., Manhone, J. and Thorpe, G.R., 2001a. Impinging Round Jet Studies In A Cilindrical Enclosure With And Without A Porous Layer: Part I: Flow Visualizations And Simulations, *Chemical Eng. Science*, Vol.56, pp. 3855-3878
- Prakash, M., Turan, F.O., Li, Y., Manhone, J. and Thorpe, G.R., 2001b. Impinging Round Jet Studies In A Cilindrical Enclosure With And Without A Porous Layer: Part II: DLV Measurements And Simulations, *Chemical Eng. Science*, Vol.56, pp. 3879-3892
- Rocamora JR, F. D., de-Lemos, M.J.S. "Analysis of convective heat transfer for turbulent flow in saturated porous media. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, v.27, n.6, p.825 - 834, 2000.
- Saito, M.B., de-Lemos, M.J.S., Interfacial heat transfer coefficient for non-equilibrium convective transport in porous media, *International Communications In Heat And Mass Transfer*, v. 32, n.5, p. 666-676, 2005.

## LAMINAR IMPINGING JET INTO A POROUS BED WITH THERMAL NON-EQUILIBRIUM. PART 2. RATIO OF SOLID THERMAL CONDUCTIVITY OVER THE FLUID THERMAL CONDUCTIVITY EFFECT

Felipe Tannús Dórea, dorea@ita.br<sup>1</sup>  
Marcelo J. S. de Lemos, delemos@ita.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Energia – IEME  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA  
12228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil

*Abstract: This work focuses on the study of influence of the ratio of solid thermal conductivity over fluid thermal conductivity in the heat transfer model used in impinging jets actuating in the presence of a porous layer where the jet is at a different temperature of the porous layer. Were evaluated two models of heat transfer: The model of an one energy equation that consider the local thermal equilibrium, the two phases, fluid and solid are in equilibrium and therefore there is no heat exchange between them, and the model of two energy equation when considers the local thermal non-equilibrium, the two phases have different temperatures and therefore exchange heat between them. The models were evaluated based on two parameters: The Nusselt number along the incidence plate and the ratio  $q_w^\phi/q_w$ , what can be seen as a measure of the effectiveness of using a porous layer for enhancing or damping the amount of heat transferred through the wall. Was observed that the porous bed eliminates the second peak in distribution of local Nusselt number and allows for controlling heat transfer from the wall, this feature may be desired in many technological applications that do not want high gradients in the incidence region and by the ratio  $q_w^\phi/q_w$  was observed to what characteristics of the porous layer the heat flow in porous media is higher than in the clean medium.*

**Keywords:** Impinging Jets, Thermal non-equilibrium, Relation  $k_s/k_f$  effect, Porous Media.

### RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.