



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ESCOAMENTO LAMINAR DE JATO IMPINGENTE SOBRE CAMADA POROSA COM NÃO EQUILÍBRIO TÉRMICO. PARTE 1. EFEITO DA ESPESSURA DA CAMADA POROSA

Felipe Tannús Dórea, dorea@ita.br¹
Marcelo J. S. de Lemos, delemos@ita.br¹

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

Resumo: Este trabalho tem como objetivo o estudo da transferência de calor de um jato impingente em uma camada porosa utilizando o modelo de não equilíbrio térmico também conhecido como modelo de duas equações de energia já que utiliza duas equações de energia macroscópicas: Uma para o fluido e outra para o sólido considerando a transferência de calor entre as fases e consequentemente sem considerar o equilíbrio térmico local, em regime laminar e utilizando simulações numéricas. O meio Poroso foi modelado como proposto por Pedras e de Lemos (2000a) e é definido como rígido, homogêneo e isotrópico. As equações de transporte macroscópicas foram escritas para um volume elementar representativo e assim se obteve um conjunto de equações válidas para todo o domínio computacional. Estas equações são discretizadas utilizando o método do volume de controle e o sistema de equações algébricas resultantes é resolvido pelo algoritmo SIP utilizando o método SIMPLE para o acoplamento pressão velocidade. Os resultados obtidos para várias espessuras de camadas porosas foram comparados com os resultados obtidos com o modelo de uma equação de energia quando se considera o equilíbrio térmico local e consequentemente não é considerado a troca de calor entre as fases fluida e sólida, foi observado que para grandes espessuras da camada porosa a influência do modelo de transferência de calor é pequena e o número de Nusselt ao longo da parede foi similar para os modelos de uma e duas equações de energia. Para pequenas espessuras da camada porosa o modelo de uma equação de energia pode não ser representativo e nesse caso é mais apropriado utilizar o modelo de duas equações de energia.

Palavras-chave: Jato Impingente, Não equilíbrio térmico, Efeito da espessura da camada porosa, Meio Poroso.

1. INTRODUÇÃO

Jatos Impingentes constituem uma importante configuração em Engenharia Térmica, sendo largamente utilizados na indústria para se obter altas taxas localizadas de transferência de calor e massa, especialmente na região de estagnação do escoamento, onde as camadas limites térmica e fluidodinâmica são muito finas, e consequentemente no cálculo da distribuição do número de Nusselt local, na placa inferior do canal observa-se altos gradientes de temperatura e um pico na região de estagnação (Figura 1a), dependendo da distância entre as superfícies de incidência e de confinamento do jato pode surgir um segundo pico na distribuição do número de Nusselt (Figura 1b). Em muitas aplicações práticas grandes variações no gradiente de temperatura não são desejáveis, uma possível solução para se neutralizar os gradientes de temperatura na superfície de incidência é a utilização de uma camada porosa sobre a região de incidência.

Por exemplo, para o uso de jatos impingentes em sistemas anti-gelo de aeronaves, seria ideal que a temperatura fosse constante e igualmente distribuída ao longo da superfície de incidência, mas uma vez que não é possível que isto ocorra devido à transferência de calor na região de incidência que faz com que a temperatura do fluxo de ar diminua e consequentemente a transferência de calor ao longo da superfície também diminua, um importante aspecto a ser avaliado é a curva de decaimento do número de Nusselt com a distância do ponto de incidência, é possível atenuar o decaimento na distribuição do número de Nusselt com a variação do espaçamento bico ejetor superfície como mostrado por Incropera e Dewitt (2003), no entanto foi observado que se consegue um efeito mais expressivo com a inserção de uma camada porosa na região de incidência.

O presente trabalho visa avaliar o efeito da espessura da camada porosa para o caso de um jato impingente sobre uma camada porosa no modelo de transferência de calor utilizado, foram avaliadas o modelo de uma equação de energia em que se considera o equilíbrio térmico local e, portanto assume que a temperatura das fases fluidas e sólidas estão em equilíbrio e, portanto não há troca de calor entre as fases, e o modelo de duas equações de energia em que se considera o não equilíbrio térmico ou seja as fases fluida e sólida estão em diferentes temperaturas e portanto trocam calor entre si.

O objetivo da presente contribuição é de estender a investigação de Graminho e de lemos (2008) que investigaram o escoamento de um jato sobre uma camada porosa isotérmica e de Fischer e de lemos (2008) que investigaram o escoamento de um jato sobre uma camada porosa não isotérmica utilizando o modelo de equilíbrio térmico ou de uma equação de energia, aplicando agora o modelo de Não-Equilíbrio Térmico – (LTNE) também conhecido como modelo de duas equações de energia. Ambos os conjuntos de resultados são comparados com o intuito de se avaliar em quais circunstâncias a adição de uma camada porosa constituída de um material com alta condutividade térmica pode aumentar a transferência de calor entre a superfície de incidência e o jato.

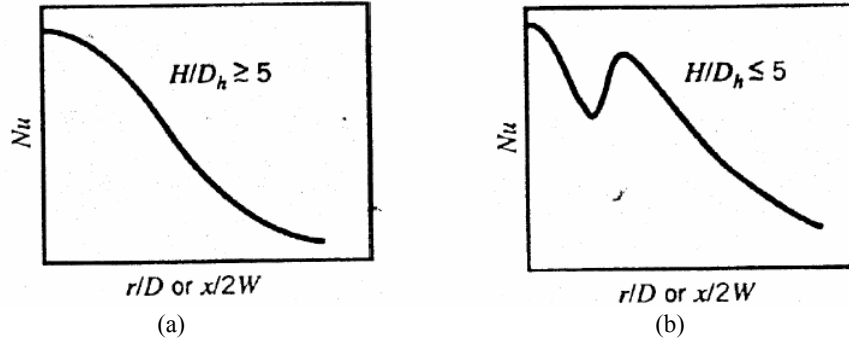


Figura 1 – Distribuição do número de Nusselt em função do espaçamento bico ejetor-superfície: (a) Grande Espaçamento, (b) Pequeno Espaçamento (Incropera and Dewitt 2003)

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A geometria e a nomenclatura analisadas são apresentadas na Fig.2. 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.

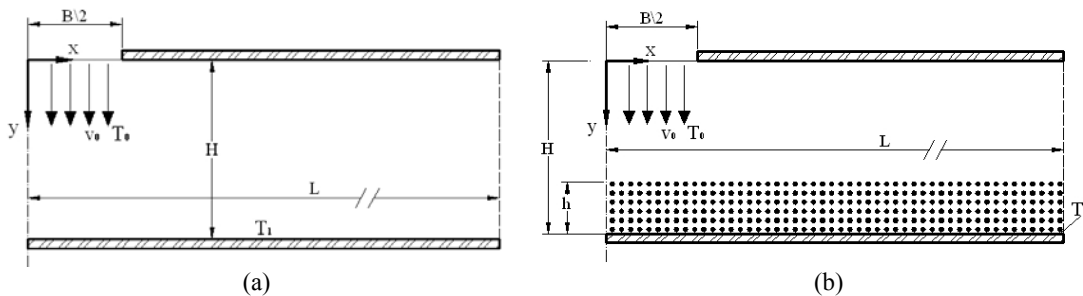


Figura 2 – Geometrias Analisadas (a) meio limpo (b) meio poroso

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 (2000) e Pedras e de Lemos (2000b).

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, \mathbf{u}_D é a média da velocidade superficial ou velocidade de Darcy, x e y são as coordenadas cartesianas, μ é a viscosidade do fluido, ϕ 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):

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

em que, ϕ 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.

A equação macroscópica de energia para o escoamento laminar em um meio poroso, utilizando a consideração de equilíbrio térmico local, mais detalhes no trabalho de Rocamora and de Lemos (2000), é dada por:

$$(\rho c_p)_f \nabla \cdot (\mathbf{u}_D \langle T \rangle^i) = \nabla \cdot \{ \mathbf{K}_{eff} \cdot \nabla \langle T \rangle^i \} \quad (4)$$

em que, c_p é o calor específico do fluido, T_f é a temperatura do fluido e \mathbf{u} é a velocidade do escoamento. Os dois últimos termos do lado direito da Eq. (3) tem o seguinte significado físico: penúltimo termo é a troca de calor convectiva em base a média macroscópica temporal da velocidade e temperatura, o último termo é a dispersão térmica associada com as flutuações microscópicas da média temporal da velocidade e temperatura. O tensor condutividade térmica efetiva, \mathbf{K}_{eff} é dado por:

$$\mathbf{K}_{eff} = [\phi k_f + (1-\phi)k_s] \mathbf{I} \quad (5)$$

Similarmente, as equações macroscópicas de energia para as fases sólidas e fluidas são obtidas, mais detalhes no trabalho de Saito e de Lemos (2005), resultando em:

$$\underbrace{(\rho c_p)_f \left[\nabla \cdot \left\{ \phi \left(\langle \mathbf{u} \rangle^i \langle T_f \rangle^i + \langle \mathbf{u}^i T_f \rangle^i \right) \right\} \right]}_{\text{Convecção}} = \underbrace{\nabla \cdot \left[k_f \nabla \langle T_f \rangle^i + \frac{1}{\Delta V} \int_{A_i} \mathbf{n}_i k_f T_f dA \right]}_{\text{condução}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta V} \int_{A_i} \mathbf{n}_i \cdot k_f \nabla T_f dA}_{\text{Troca de calor entre as fases}} \quad (6)$$

$$0 = \nabla \cdot \left\{ k_s \nabla \left[(1-\phi) \langle T_s \rangle^i \right] - \frac{1}{\Delta V} \int_{A_i} \mathbf{n}_i k_s T_s dA \right\} - \frac{1}{\Delta V} \int_{A_i} \mathbf{n}_i \cdot k_s \nabla T_s dA \quad (7)$$

em que A_i é a área interfacial no interior do REV e \mathbf{n}_i é um vetor normal a interface fluido-sólida, apontando do fluido para o sólido.

Transferência de Calor entre as Fases

Nas Eqs. (4) e (5) o calor transferido entre as duas fases pode ser modelado por um coeficiente de película h_i , da seguinte forma,

$$h_i a_i \left(\langle T_s \rangle^i - \langle T_f \rangle^i \right) = \frac{1}{\Delta V} \int_{A_i} \mathbf{n}_i \cdot k_f \nabla T_f dA = \frac{1}{\Delta V} \int_{A_i} \mathbf{n}_i \cdot k_s \cdot \nabla T_s dA \quad (8)$$

em que $a_i = A_i / \Delta V$ é a área interfacial por unidade de volume. No meio poroso altos valores de a_i é vantajoso para a troca de calor por condução através do sólido seguido pela convecção através do fluido.

Wakao et al. (1979) obtiveram uma correlação para um meio poroso com diâmetro da partícula D e compararam seus resultados com dados experimentais, esta correlação para transferência de calor interfacial é dada por:

$$\frac{h_i D}{k_f} = 2 + 1.1 \text{Re}_D^{0.6} \text{Pr}^{1/3} \quad (9)$$

A correlação numérica para a troca de calor convectiva foi proposta por Kuwahara et al (2001) para escoamento laminar:

$$\frac{h_i D}{k_f} = \left(1 + \frac{4(1-\phi)}{\phi}\right) + \frac{1}{2}(1-\phi)^{1/2} \text{Re}_D \text{Pr}^{1/3}, \text{ válido para } 0.2 < \phi < 0.9, \quad (10)$$

Utilizando o modelo mostrado na Eq. (7) que introduz a transferência de calor entre as fases h_i , que é calculada pela Eq.(8), as equações de energia (4) e (5) podem ser reescritas como:

$$\left(\rho c_p\right)_f \nabla \cdot \left(\mathbf{u}_D \langle T_f \rangle^i\right) = \nabla \cdot \left\{ \mathbf{K}_{eff,f} \cdot \nabla \langle T_f \rangle^i \right\} + h_i a_i \left(\langle T_s \rangle^i - \langle T_f \rangle^i \right) \quad (11)$$

$$0 = \nabla \cdot \left\{ \mathbf{K}_{eff,s} \cdot \nabla \langle T_s \rangle^i \right\} - h_i a_i \left(\langle T_s \rangle^i - \langle T_f \rangle^i \right) \quad (12)$$

em que, $\mathbf{K}_{eff,f}$ e $\mathbf{K}_{eff,s}$ são os tensores condutividade efetiva para as fases fluidas e sólidas respectivamente, dadas por:

$$\mathbf{K}_{eff,f} = [\phi k_f] \mathbf{I} + \mathbf{K}_{disp} \quad (13)$$

$$\mathbf{K}_{eff,s} = [(1-\phi) k_s] \mathbf{I} \quad (14)$$

e \mathbf{I} é o tensor unitário.

Parâmetros Adimensionais:

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

Número de Nusselt para a fase fluida:

$$Nu_f = \frac{-2H}{T_1 - T_0} \left(\frac{\partial \langle T_f \rangle^i}{\partial y} \right) \quad (15)$$

Número de Nusselt para a fase sólida:

$$Nu_s = \frac{-2H}{T_1 - T_0} \left(\frac{\partial \langle T_s \rangle^i}{\partial y} \right) \quad (16)$$

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:

$$Nu = \frac{-2H}{T_1 - T_0} \left(\frac{\partial \langle T \rangle^i}{\partial y} \right) \quad (17)$$

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

Para o meio limpo tem-se um caso particular destas equações para quando ϕ é igual a 1 e K tende ao infinito.

4. METODO NUMÉRICO

As equações (1),(2), (10) e (11) 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 dos volumes finitos foi utilizado na discretização e o algoritmo SIMPLE Patankar (1980) foi utilizado no acoplamento pressão velocidade.

A Fig. 3 apresenta um volume de controle típico com o sistema de coordenadas generalizadas, $\eta - \xi$. A forma geral e a forma discretizada da equação de conservação bi-dimensional para uma propriedade genérica ϕ , em regime permanente, é dada por:

$$I_e + I_w + I_n + I_s = S_\phi \quad (18)$$

em que I_e , I_w , I_n e I_s representam, respectivamente, os fluxos de ϕ nas faces leste, oeste, norte e sul do volume de controle e S_ϕ é o termo fonte.

Todo o termo fonte é dependente de $\langle \phi \rangle^i$, e serão linearizados da seguinte forma:

$$S_\varphi \approx S_\varphi^{**} \langle \varphi \rangle_p^i + S_\varphi^* \quad (19)$$

Os termos fonte na equação de conservação de quantidade de movimento na direção x são dadas por:

$$S^{*x} = (S_e^{*x})_P - (S_w^{*x})_P + (S_n^{*x})_P - (S_s^{*x})_P + S_P^* \quad (20)$$

$$S^{**x} = S_\phi^{**} \quad (21)$$

em que, S^{*x} é a parte difusiva tratada na forma explícita. O termo S^{**x} na equação para o meio poroso é composto pelo termo do coeficiente de Darcy na direção x .

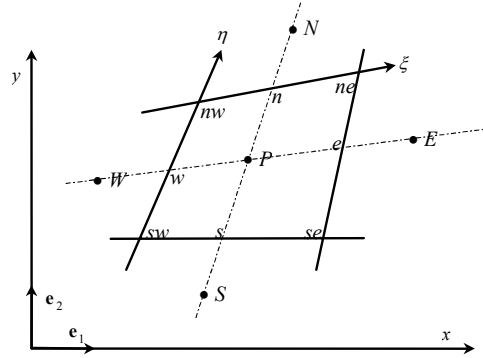


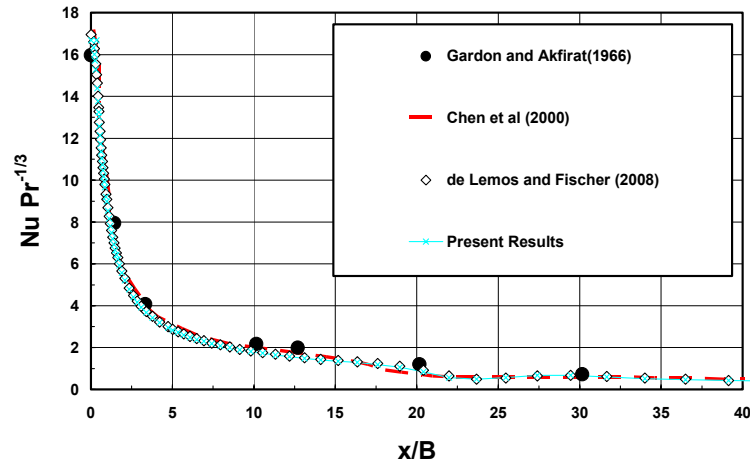
Figura 3 – Volume de Controle e notação

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 4a mostra a distribuição do Nusselt local na placa inferior de incidência do jato e é comparada com os dados experimentais de Gardon e Akfirat (1966) os resultados numéricos de Chen et al (2000) e os resultados numéricos de De lemos e Fischer (2008). Para realizar esta comparação foi necessário normalizar o Nusselt local com $Pr^{-1/3}$. O número de Reynolds é $Re = 450$, o perfil de velocidades na entrada é completamente desenvolvido para o escoamento entre placa paralelas Fox (1998), o perfil de temperatura é uniforme e a razão entre o espaçamento do bico ejetor para a placa de incidência e a largura do bico ejetor é $H/B = 4$.

A Figura 4b mostra a comparação do número de Nusselt local próximo a placa inferior com os resultados numéricos de Chiriac e Ortega (2002) e com os resultados numéricos de De lemos e Fischer (2008). O perfil de velocidade e temperatura na entrada são uniformes e a razão entre o espaçamento do bico ejetor para a placa de incidência e a largura do bico ejetor é $H/B = 5$.



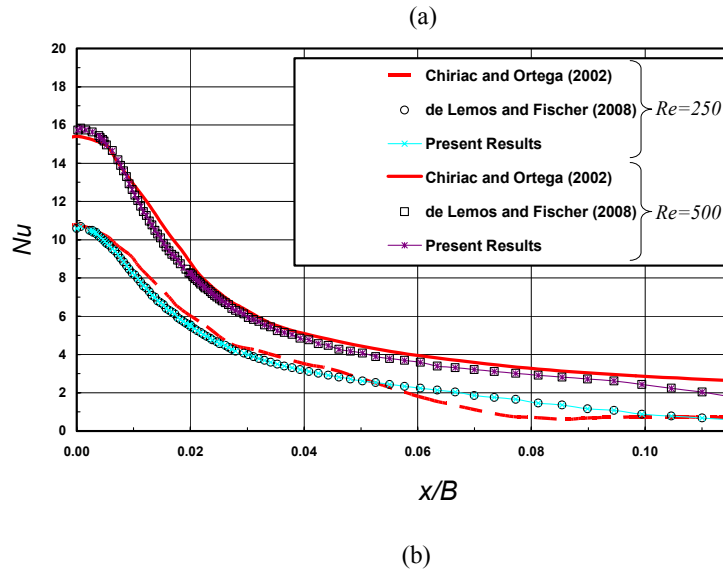


Figura 4- Distribuição do número de Nu na placa inferior para meio limpo. (a) $H/B = 4$ (b) $H/B = 5$

A Fig. 4 mostra que os resultados obtidos tiveram uma boa concordância com os valores encontrados na literatura, confirmando a validação do código e da malha. O jato Impingente apresenta três regiões com características distintas Inropera (2003). A região de entrada é chamada de *jato livre*, nessa região o escoamento não é afetado pela incidência do jato na superfície alvo e a velocidade axial do jato é quase constante ao seu valor nominal. A *região de estagnação* corresponde a região em que o escoamento é influenciado pela incidência na placa alvo, e é desacelerado e quase toda energia cinética é transformada em um aumento da pressão estática. Após o impacto o escoamento é redirecionado e acelerado novamente ao longo da superfície de incidência. Entretanto a aceleração do escoamento na direção horizontal não pode continuar indefinidamente e esse é transformado em um jato de parede em desaceleração, que constituem a camada limite. As características acima do escoamento na região de estagnação estão demonstradas nos picos do número de Nusselt como mostrado na Fig. 4.

Todos os seguintes 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 5, 6 e 7 respectivamente, mostram as linhas de corrente e os perfis de temperatura do fluido e do sólido para várias espessuras de camada porosa.

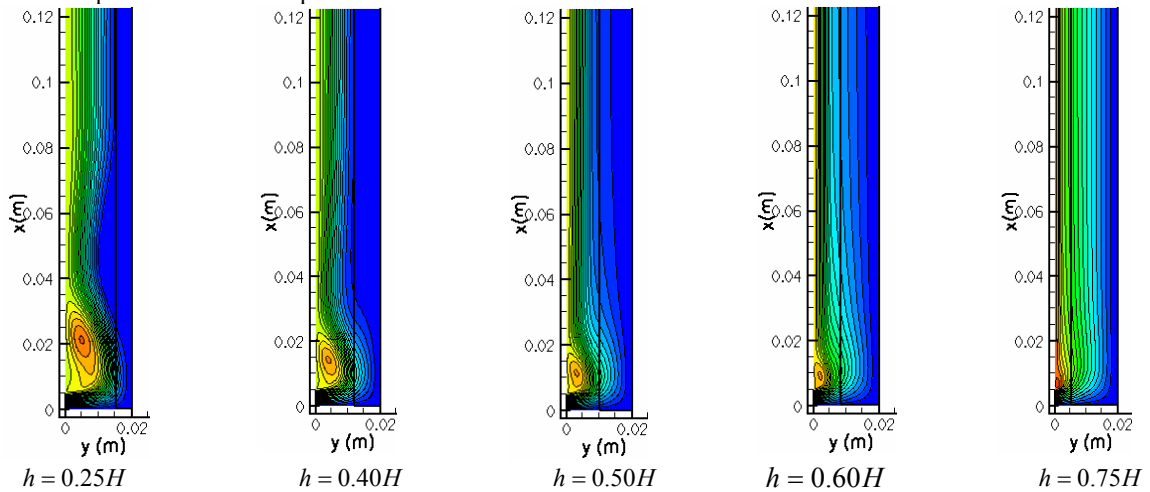


Figura 5 – Linhas de corrente para várias espessuras de camada porosa com $Re=750$, $H/B = 2$ e $\phi = 0.9$

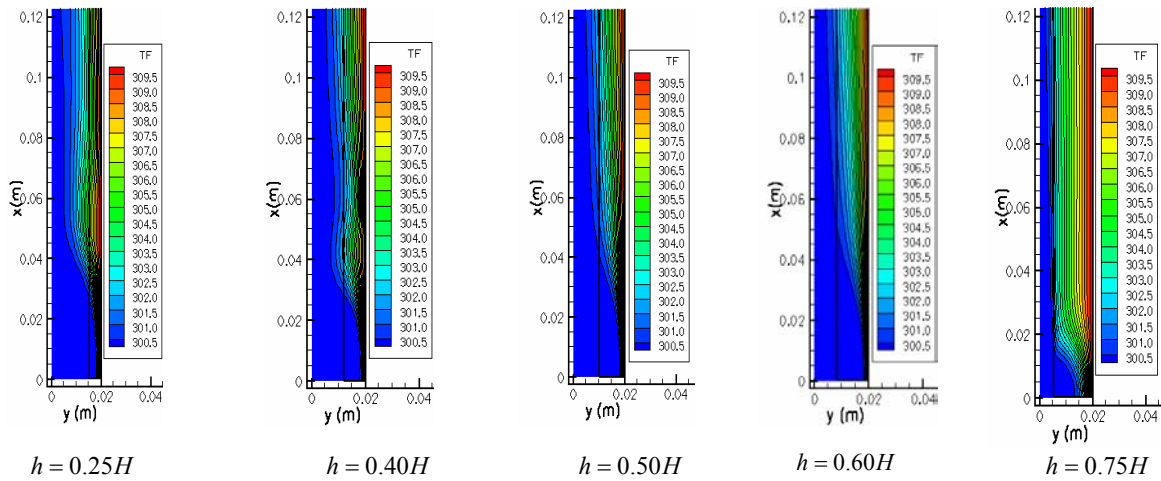


Figura 6 – Campos de distribuição da temperatura do fluido para varias espessuras de camada porosa com $Re = 750$, $H/B = 2$ e $\phi = 0.9$

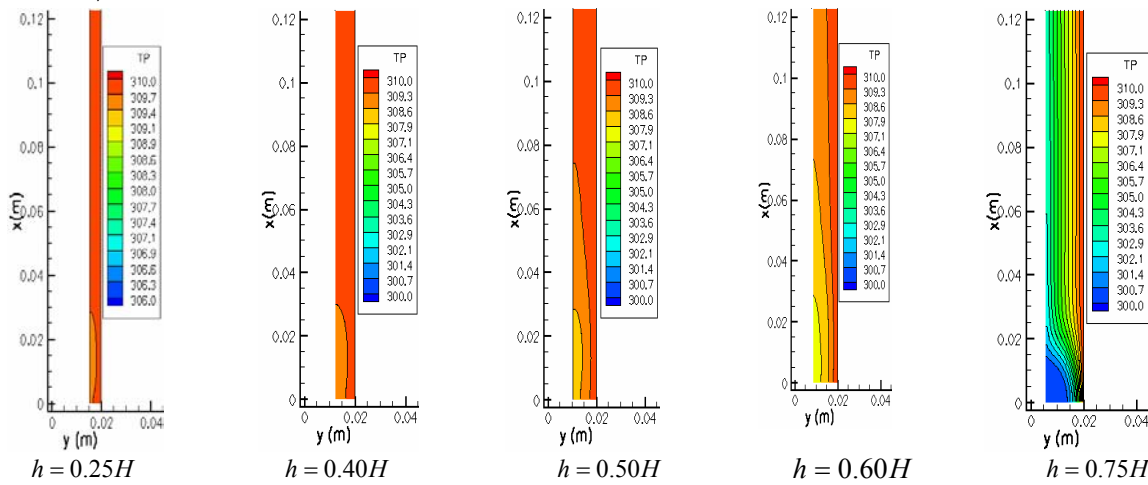


Figura 7 – Campos de distribuição da Temperatura do sólido para várias espessuras de camada porosa com $Re = 750$, $H/B = 2$ e $\phi = 0.9$

Na Fig 5 observa-se uma primeira região de recirculação próximo a entrada do jato que ocorre principalmente devido a mistura do escoamento que sai do bico ejetor com o fluido que está no resto do meio, observa-se também uma segunda região de recirculação logo após a primeira à medida que a espessura da camada porosa aumenta a primeira região de recirculação diminui e a segunda desaparece uma vez que o meio poroso impõe uma perda de carga no escoamento que o desacelera.

Através das figuras 6 e 7 pode-se observar a transferência de calor entre as fases sólida e fluida do meio poroso, quanto maior é a espessura do meio poroso menores são os gradientes de temperatura entre o jato e a camada porosa as figuras abaixo permitem quantificar esses gradientes através do calculo dos Números de Nusselt da fase fluida e da fase sólida também é realizada uma comparação entre os modelos de uma e duas equações de energia no intuito de avaliar a representatividade dos modelos em função da altura da camada porosa.

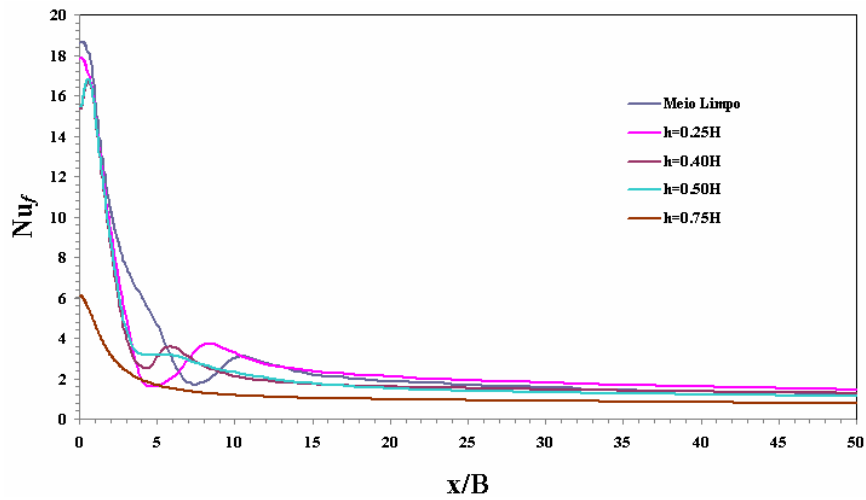


Figura 8 – Distribuição do número de Nusselt para a fase fluida para várias espessuras de camada porosa

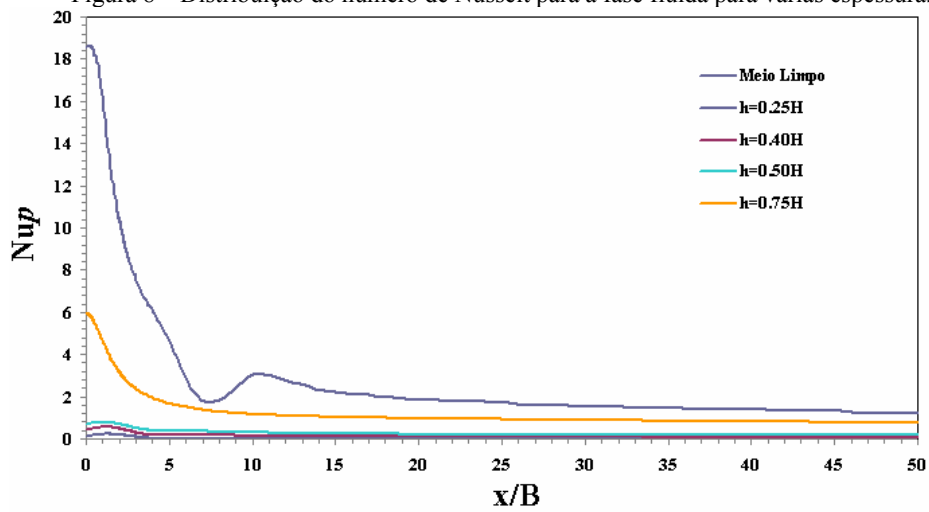


Figura 9 – Distribuição do número de Nusselt da fase sólida para várias espessuras de camada porosa

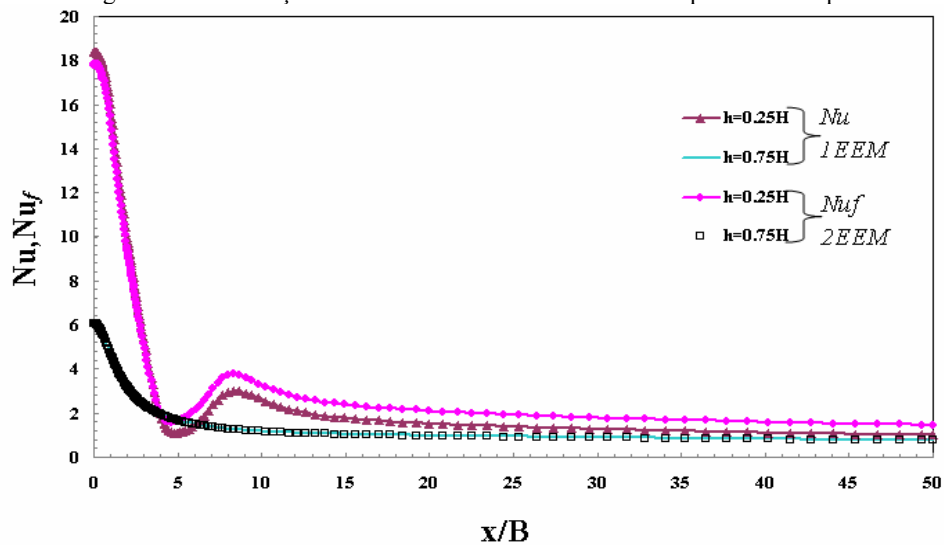


Figura 10 – Comparação dos Modelos de uma e duas equações de energia

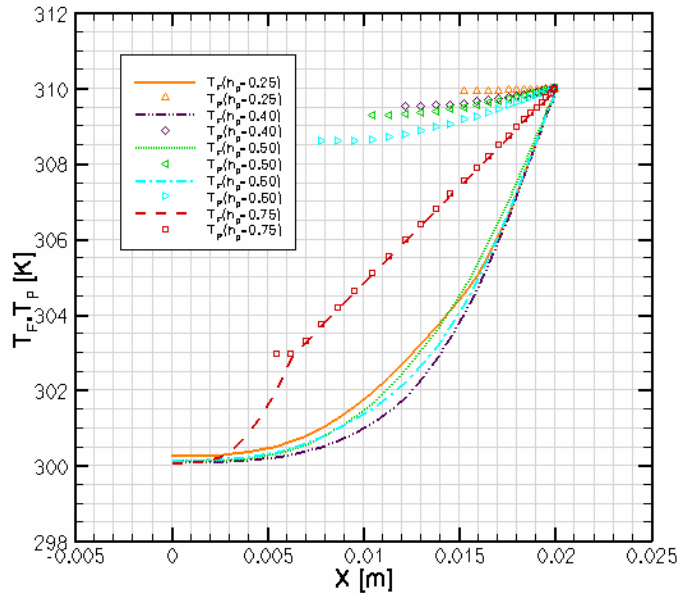


Figura 11 – Perfis de temperatura das fases fluida e sólida para várias espessuras de camada porosa em $X/B=8$

A figura 8 mostra que para a espessura da camada porosa ocupando 25% do canal observa-se a existência do pico no número de Nusselt para a fase fluida assim como para o meio limpo, a camada porosa faz com que haja uma defasagem entre os picos do meio limpo e da camada porosa ocupando 25% do canal, para as espessuras de 50% e 75% há uma neutralização nos gradientes e conseqüentemente o desaparecimento do pico na distribuição do número de Nusselt e conforme a espessura da camada porosa aumenta os gradientes tendem a diminuir. A figura 9 mostra um efeito contrário à figura 8, ou seja, os gradientes de temperatura na fase sólida tendem a diminuir quando a espessura da camada porosa diminui esse efeito contrário apresentado pelas figuras 8 e 9 indica a troca de calor entre as fases e a tendência ao equilíbrio térmico como pode ser observado pela figura 11 que mostra os perfis de temperatura para as fases fluida e sólida na região de maior gradiente, ou seja, no pico da distribuição do número de Nusselt em $X/B=8$.

A figura 10 compara os dois modelos de transferência de calor de uma e duas equações de energia e observa-se que quanto maior a espessura da camada porosa maior a área de troca de calor e, portanto mais completa é a troca de calor entre as fases e, portanto maior é a tendência ao equilíbrio térmico por isso o modelo de equilíbrio térmico se aproxima do modelo de não equilíbrio térmico.

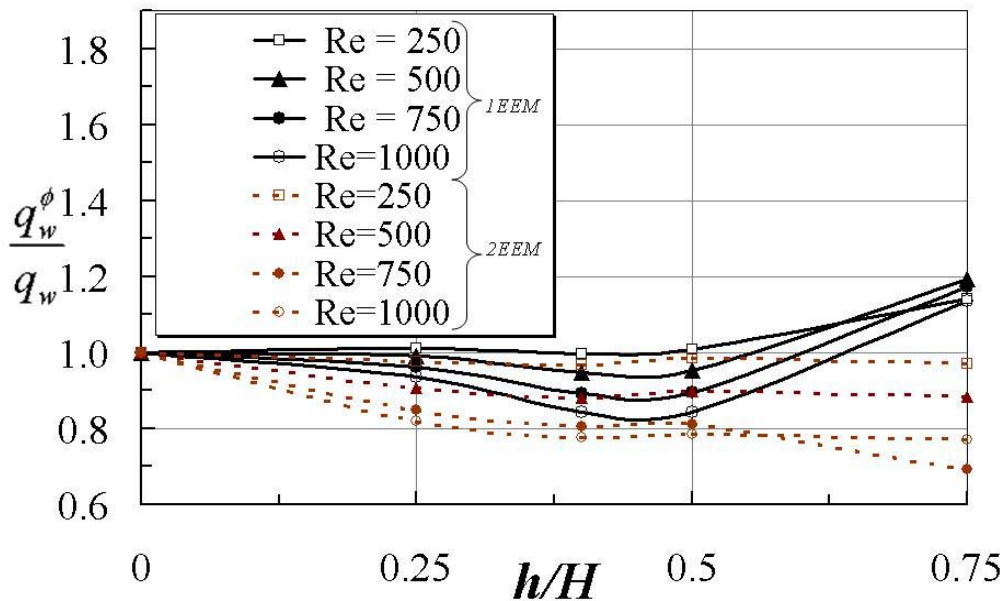


Figura 12 – Comparação do Modelo de uma e duas equações de energia para várias alturas de camada porosa

Para avaliar a efetividade em se utilizar uma camada porosa para o escoamento de um jato impingente confinado, foi calculado o fluxo de calor integral transferido da parede de incidência. Essa transferência de calor integral da parede inferior pode ser calculada para as duas configurações apresentadas na Figura 2, assim:

$$q_w = \frac{1}{L} \int_0^L q_{w,x}(x) dx \quad (22)$$

Dependendo do modelo de energia utilizado, existem duas possibilidades para a transferência de calor local $q_{w,x}$. Pode-se utilizar a hipótese de equilíbrio térmico local (LTE), ou então, a transferência de calor local de cada fase pode ser calculada 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:

$$q_w = \frac{1}{L} \int_0^L q_{w,x}(x) dx; \quad q_{w,x} = -k_{eff} \left. \frac{\partial \langle T \rangle^i}{\partial y} \right|_{y=H}; \quad k_{eff} = \phi k_f + (1 - \phi) k_s \quad (23)$$

Para o modelo de duas equações de energia:

$$q_w = \frac{1}{L} \int_0^L q_{w,x}(x) dx; \quad q_{w,x} = -k_{eff,f} \left. \frac{\partial \langle T_f \rangle^i}{\partial y} \right|_{y=H} - k_{eff,s} \left. \frac{\partial \langle T_s \rangle^i}{\partial y} \right|_{y=H}; \quad \begin{cases} k_{eff,f} = \phi k_f \\ k_{eff,s} = (1 - \phi) k_s \end{cases} \quad (24)$$

Para os casos em que a camada porosa é considerada, o fluxo de calor na parede é dado por um sobrescrito ϕ na forma q_w^ϕ . A razão q_w^ϕ/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.

6. CONCLUSÕES

Através das análises realizadas observa-se que para espessuras de camada porosa maior que 25% do canal há uma neutralização dos gradientes no ponto de máximos gradientes o que é demonstrado pelo desaparecimento do pico na curva de distribuição do número de Nusselt.

Observa-se o comportamento do modelo de não equilíbrio térmico através da análise das curvas de Nusselt para as fases sólida e fluida, é possível avaliar a troca de calor entre as fases, já que as curvas apresentam tendências contrárias, enquanto o Nusselt da fase fluida tende a aumentar para pequenas espessuras de camada porosa o Nusselt da fase sólida tende a diminuir para pequenas espessuras de camada porosa.

Quanto menor é a espessura da camada porosa maior a diferença entre os modelos de transferência de calor, já que para grandes espessuras de material poroso a tendência de ocorrer o equilíbrio entre as fases é maior e, portanto é pertinente a consideração de equilíbrio térmico local, o contrário ocorre para pequenas camadas de material poroso quanto menor a camada porosa menor a tendência ao equilíbrio térmico entre as fases e, portanto deve se considerar a hipótese de não equilíbrio térmico.

Observa-se através da Figura 12 que o modelo de uma equação de energia superestimou o calor extraído através da camada porosa e que para as configurações analisadas o calor extraído sem a presença da camada porosa é maior que com a camada porosa, portanto do ponto de vista do calor extraído não é conveniente colocar uma camada porosa com essas características com o intuito de aumentar a transferência de calor.

7. AGRADECIMENTOS

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

8. DIREITOS AUTORAIS.

Os autores são os únicos responsáveis pelo material contido 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).
- Fox, R.W., McDonald, A.T., “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 4ª edição, editora LTC, 1998
- 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)
- Patankar, S.V., (1980), “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere, New York
- 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.
- Saito, M. B., De Lemos, M.J.S., A Correlation for Interfacial Heat Transfer Coefficient for Turbulent Flow Over an Array of Square Rods, *Journal of Heat Transfer*, 128, 444-452, 2006.

LAMINAR IMPINGING JET INTO A POROUS BED WITH THERMAL NON-EQUILIBRIUM. PART 1. POROUS LAYER THICKNESS EFFECT

Felipe Tannús Dórea, dorea@ita.br¹

Marcelo J. S. de Lemos, delemos@ita.br¹

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

Abstract: This work focuses on the study of heat transfer in impinging jets actuating in the presence of a porous layer considering the thermal non-equilibrium also known as two energy equation model, using two macroscopic equations of energy: One for the fluid and another for the solid without considering the local thermal equilibrium, in laminar regime by using numerical simulations. Porous media was modeled as proposed in Pedras & de Lemos (2000a) and defined as rigid, homogeneous and isotropic. The macroscopic transport equations are written for an elementary representative volume yielding a set of equation valid for the entire computational domain. These equations are discretized using the control volume method and the resulting system of algebraic equations are solved by the SIP algorithm utilizing the SIMPLE method for the pressure-velocity coupling. The results obtained for several porous layer thicknesses were compared with results obtained with the one energy equation model when considering the local thermal equilibrium and therefore is not considered the heat exchange between fluid and solid phase, was observed for higher porous layer thickness smaller influence of the model of Heat Transfer and the Nusselt number along the lower plate was similar for both models. For small porous layer thickness the results of one energy equation model not be representative indicating that in this case is more appropriate to use the two energy equation model.

Keywords: *Impinging Jets, Thermal Non-Equilibrium, Porous Layer Thickness Effect, Porous Media.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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