

## CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CONVECÇÃO NATURAL EM PLACA PLANA VERTICAL

**Saulo Güths**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT)

Departamento de Engenharia Mecânica

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

88040-900 Florianópolis / SC

[saulo@lmpt.ufsc.br](mailto:saulo@lmpt.ufsc.br)

**Resumo.** Em 1952 Simon Oostrach apresentou a solução para o escoamento laminar em uma placa plana vertical isotérmica. Esse caso oferece uma oportunidade única de validação dos instrumentos pela possibilidade de comparação dos resultados experimentais com análises teóricas. Os estudos tanto teóricos como experimentais continuam, visando avaliar o comportamento em condições e configurações diversas. No presente trabalho será apresentada uma análise numérica de uma experimentação realizada com uma placa plana vertical isotérmica onde foi determinado o coeficiente de troca de calor por convecção "h" através da medição do fluxo de calor. Esse trabalho é motivado por questionamentos advindos durante a experimentação, onde detectou-se um curioso acréscimo do coeficiente de troca de calor por convecção quando a placa era aproximada da base. Serão apresentados os resultados de uma simulação numérica onde é avaliada a influência da espessura da placa, da espessura do isolamento posterior, da forma da borda de ataque, da distância da parede e da distância da base.

**Palavras chave:** placa plana vertical, convecção, fluxo de calor

### 1. Introdução

No estudo da convecção natural a placa plana vertical é apresentada como um caso clássico. O motivo é não somente a larga aplicação, mas o fato de existir uma solução obtida a partir das equações de conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento que descrevem o fenômeno.

Foi em 1952 que Simon Oostrach apresentou a solução para o escoamento laminar em uma placa plana vertical isotérmica para números de Prandtl variando de 0,01 a 1000. Outras correlações teóricas e experimentais são disponíveis na literatura (Eckert, 1950; Taine e Petit, 1989; Gibling, 1974; Schmidt e Beckmann, 1930; Timma e Padet, 1985; Vynnycky e Kimura, 1996). Essas correlações são válidas para um escoamento laminar que ocorre, segundo Mahajan e Gebhart (1979), para valores de  $Gr_y$  inferiores a  $1,5 \cdot 10^9$  ( $Pr=0,7$ ).

Basicamente as formas de determinação do coeficiente de troca de calor por convecção (h), ou número de Nusselt (Nu), podem ser através da medição do perfil de temperatura do fluido ou através de medições ditas "calorimétricas". O método do perfil de temperatura parte do princípio de que a camada de fluido junto à parede é estática. Mergui e Penot (1996), Sammakia et al (1995), El Alami (1994), Khabbazi (1993) entre outros realizaram experimentos utilizando essa técnica. Contudo a exata medição do gradiente de temperatura junto à parede requer uma experimentação acurada.

Na outra forma de medição, dita calorimétrica, determina-se o fluxo de calor trocado pela superfície. Dentro dessa categoria estão os métodos calorimétricos propriamente ditos, que determinam o fluxo de calor trocado pela variação da temperatura de um fluido que circula por um trocador de calor (La Pica et al, 1993; Collins et al, 1993). As trocas de calor parasitas são a grandes fontes de incerteza desse método. A determinação de coeficiente de troca local requer um grande número de trocadores de calor.

Outro método, aplicado por Güths (1994), utiliza transdutores de fluxo de calor (ou fluxímetros). Esse método tornou-se viável após o desenvolvimento de uma nova classe de fluxímetros, chamados "a gradiente tangencial" (They et al., 1980; Lassue et al., 1993; Güths, 1995), que apresentam baixa resistência térmica e alta sensibilidade. A bancada experimental consistia de uma placa plana isotérmica vertical com 500 mm de altura mantida a aproximadamente 10 K acima da temperatura ambiente e instrumentada com 10 fluxímetros (dimensão 50 mm x 50 mm). Os resultados experimentais apresentaram boa concordância com valores disponíveis na literatura. Contudo alguns ensaios revelaram um curioso acréscimo do coeficiente de troca junto à borda inferior, quando esta era aproximada da base (Figura 1).

Esperava-se que o coeficiente de troca na região inferior fosse reduzindo progressivamente a medida que a placa aproximasse da base, como resultado da constrição ao escoamento nessa região. Entretanto para  $y_{base} = 50$  mm o coeficiente de troca superou o valor encontrado quando a placa estava a uma distância de 300 mm da base (considerado suficientemente grande para não exercer nenhuma influência). Para  $y_{base} = 0$  o valor do coeficiente de troca foi menor, conforme esperado. A busca pela compreensão desse fenômeno levou à simulação numérica apresentada nesse trabalho

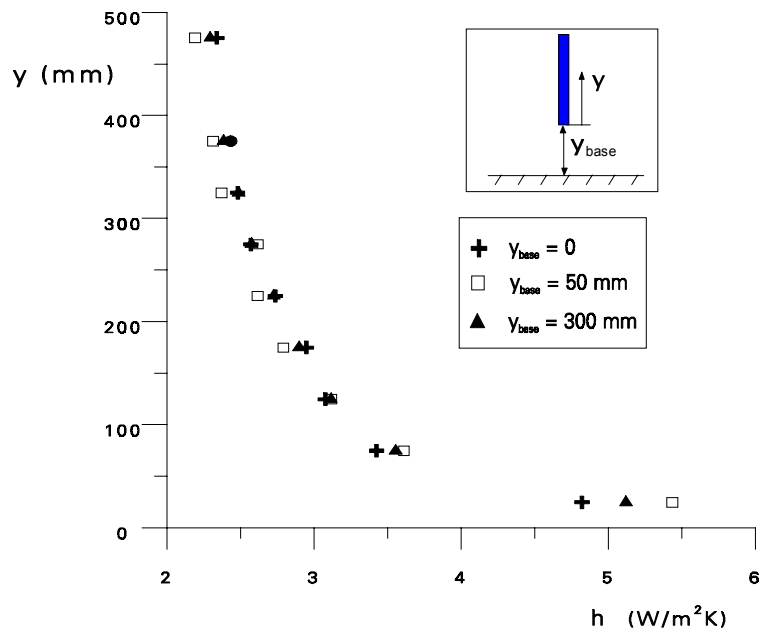


Figura 1 - Coeficiente de troca de calor por convecção ( $h$ ) em função da altura ( $y$ ) e para diferentes distâncias entre a placa e o solo  $y_{base}$ .

## 2. Modelização

A simulação numérica foi motivada pela busca dos parâmetros causadores do fenômeno observado na experimentação da placa plana vertical, conforme citado na seção anterior. As várias configurações testadas serão apresentadas de forma seqüencial, e os possíveis parâmetros responsáveis por mudanças no coeficiente de troca serão analisados separadamente. Essa análise tem igualmente o objetivo de auxiliar o projeto construtivo de bancadas experimentais semelhantes, avaliando a importância de vários parâmetros dimensionais.

Optou-se por utilizar o programa FLUENT® como ferramenta numérica dado sua relativa simplicidade na modelização e solução de problemas envolvendo trocas convectivas, condutivas e radiantes utilizando o método dos volumes finitos na discretização das equações de transporte. A Figura 2 mostra a modelização bidimensional da placa plana vertical representada por um corpo isotérmico com 12 mm de espessura e 500 mm de altura. O isolamento posterior da placa é representado por um corpo com 21 mm de espessura e condutividade térmica igual a 0.05 W/mK. A terminologia "placa" apresentada na seqüência desse trabalho refere-se ao conjunto placa de cobre e isolante térmico.

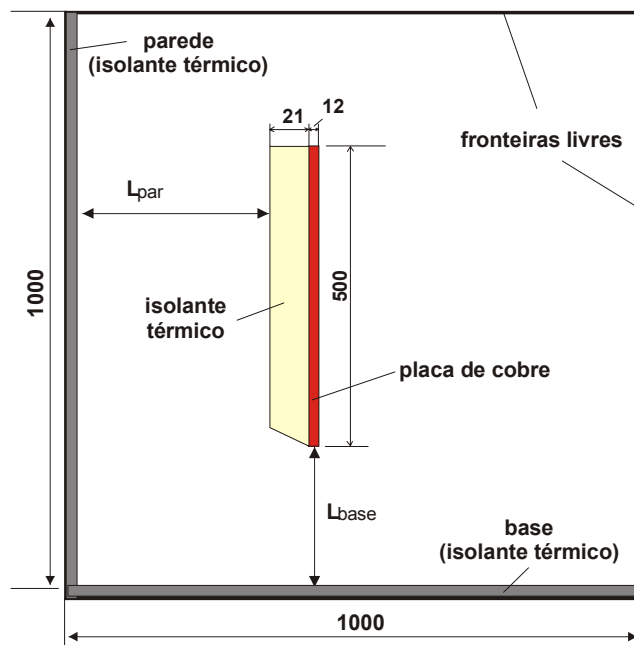


Figura 2 - Modelização da placa plana vertical

Visando representar as condições de experimentação considerou-se a borda de ataque da placa isotérmica com uma forma reta e a borda do isolante com forma afilada. As fronteiras foram consideradas permeáveis. O sistema foi discretizado em 130 x 115 células, com concentração na superfície da placa isotérmica, na borda de ataque e na região de saída.

### 3. Validação do método

Antes de iniciar a simulação do problema em questão, procurou-se validar o modelo resolvendo o caso clássico da placa plana vertical. Para eliminar possíveis efeitos de borda, considerou-se a placa encastrada em material isolante. A Figura 3 mostra uma comparação do coeficiente de troca de calor por convecção ( $h$ ) em função da altura a partir da borda da placa ( $y$ ) para duas condições distintas: i)  $T_{\text{placa}} - T_{\infty} = 10 \text{ K}$ ; ii)  $T_{\text{placa}} - T_{\infty} = 20 \text{ K}$ . O escoamento pode ser considerado laminar ( $Gr < 10^9$ ).

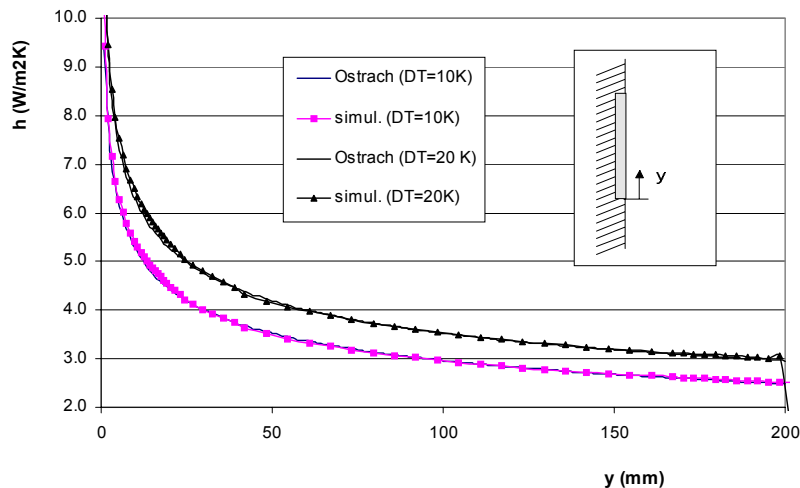


Figura 3 - Comparação entre valores teóricos (Oostrach, 1952) e simulados para placa isotérmica encastrada em corpo isolante

A convergência foi obtida em aproximadamente 3000 iterações tendo como critério uma variação da entalpia inferior a  $10^{-4} \text{ J/kg}$ . A excelente concordância entre os resultados teóricos e simulados habilitou o método para uma análise mais detalhada do fenômeno da convecção natural em outras configurações.

### 4. Efeito do isolamento posterior

Dentre as buscas aos parâmetros possíveis de influenciar o coeficiente de troca, procurou-se avaliar a influência do isolamento da face posterior da placa. Para a condição padrão - placa 10 K acima da temperatura ambiente e isolamento com 21 mm de espessura - o acréscimo de temperatura superficial da camada isolante foi inferior a 2 K. Comparando-se com resultados de uma simulação onde o isolamento foi considerado perfeito (condição adiabática), não foi possível observar qualquer variação no coeficiente de troca na face frontal da placa. Dessa forma em todas as simulações realizadas considerou-se o isolamento perfeito (condutividade térmica nula), permitindo uma redução do tempo de convergência.

### 5. Efeito da forma da borda inferior

A simulação numérica obteve uma boa concordância com os valores obtidos teoricamente por Oostrach (1952) quando a placa foi considerada encastrada em uma parede com condutividade térmica nula. Para placas livres no meio fluido pode-se notar uma leve variação do coeficiente de troca na região próxima da borda de ataque (Figura 4). Essa variação foi mais acentuada para uma placa com base reta (espessura da placa = 33 mm). A superfície posterior da placa foi novamente considerada com isolamento perfeito (conforme seção anterior) de forma a eliminar possíveis efeitos convectivos gerados nessa região.

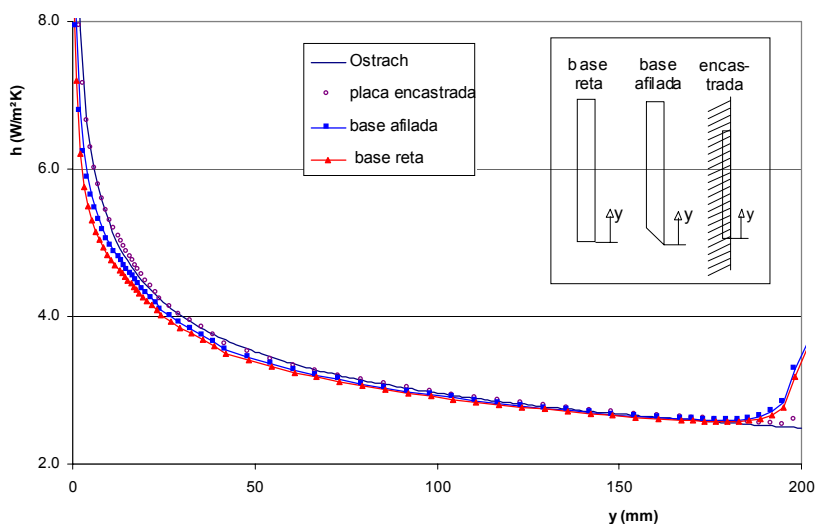


Figura 4 - Coeficiente de troca de calor por convecção (h) em função da altura (y)

Uma análise dos perfis de velocidade mostrou que a velocidade na borda de ataque da placa não-encastrada é significativamente superior à velocidade da placa encastrada, podendo a primeira vista ser contraditório com o fato de apresentar um menor coeficiente de troca nesse local. Contudo a análise do campo de temperatura mostra que essa região encontra-se mais aquecida, havendo assim um menor gradiente de temperatura junto à placa, e conseqüentemente uma troca de calor inferior. Na região superior da placa houve um súbito acréscimo do coeficiente de troca. Atribui-se esse fenômeno a um pequeno vórtice formado na região, aumentando o coeficiente de troca.

### 6. Efeito da espessura da placa

Para avaliar apenas a influência da espessura da placa sobre o coeficiente de troca (na região de entrada) a face posterior foi considerada adiabática. A Figura 5 mostra o coeficiente de troca na região de entrada para diferentes espessuras da placa. Pode-se notar uma forte redução do coeficiente de troca com o aumento da espessura.

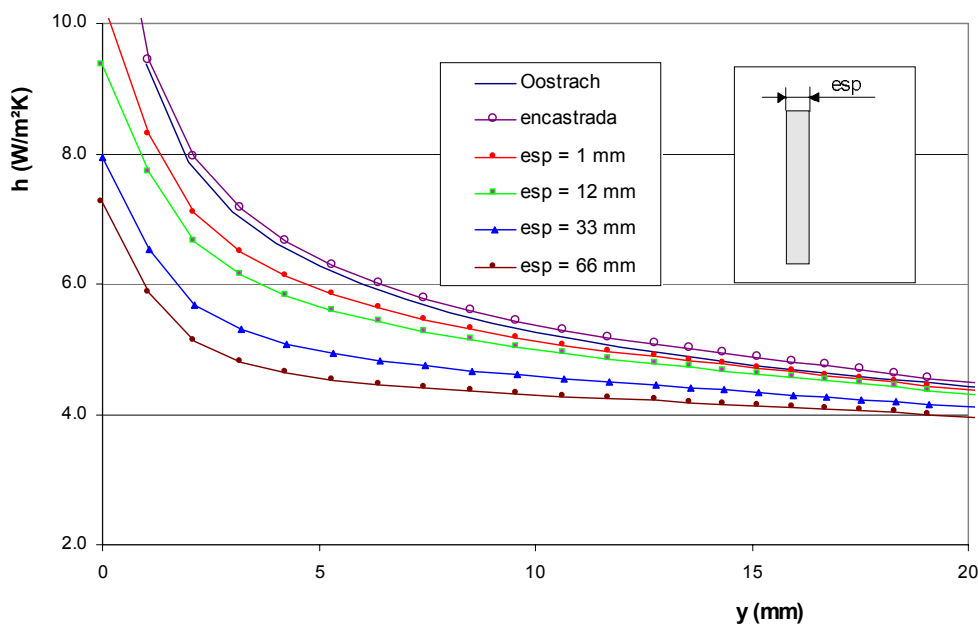


Figura 5 - Coeficiente de troca de calor por convecção (h) em função da altura (y) para diferentes espessuras da placa

Esse fenômeno é devido à formação de uma região de fluido aquecido - tanto maior quanto a espessura da placa - que vem reduzir as trocas de calor na região junto à borda de ataque. A Figura 6 mostra que o coeficiente de troca varia assintoticamente com a espessura da placa em diferentes valores da altura "y". Essa variação tende a ser menor em regiões mais distantes da borda, convergindo para a solução de placa encastrada.

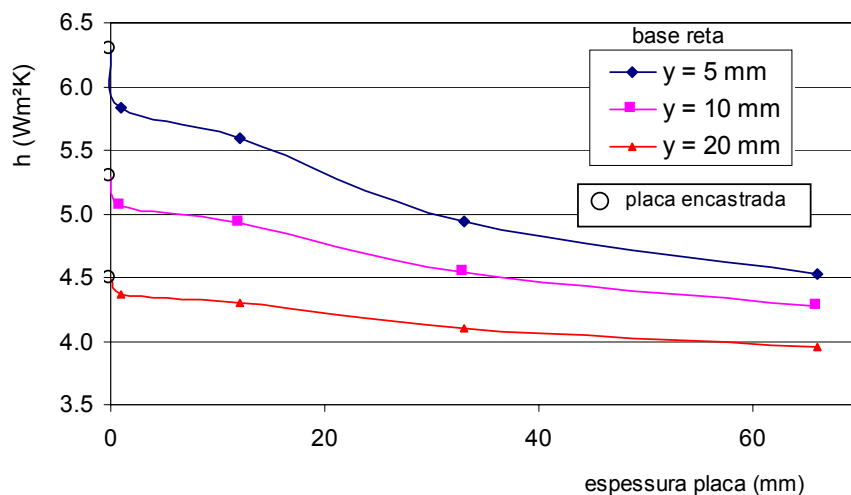


Figura 6 - Coeficiente de troca de calor por convecção (h) em função espessura da placa para diferentes alturas (y)

### 7. Influência da altura placa-base

Conforme anteriormente citado, um dos objetivos maiores dessa simulação consiste na análise do fenômeno observado em um dispositivo experimental, onde ocorreu um acréscimo do coeficiente de troca quando a placa quente aproximou-se da base. O resultado dessa análise é mostrado na Figura 7. A única distorção do coeficiente de troca observada ocorreu quando a placa encontrava-se apoiada na base: houve uma sensível redução do coeficiente de troca seguido de uma leve recuperação. Esse fenômeno é devido à formação de uma região de estagnação no vértice do contato placa-base, reduzindo o coeficiente de troca.

A recuperação do "h" pode ser explicado pela modificação do campo de velocidades, atingindo a região inferior da placa com um ângulo mais elevado. Contudo a variação do coeficiente de troca constatado na experimentação não foi observado nessa simulação.

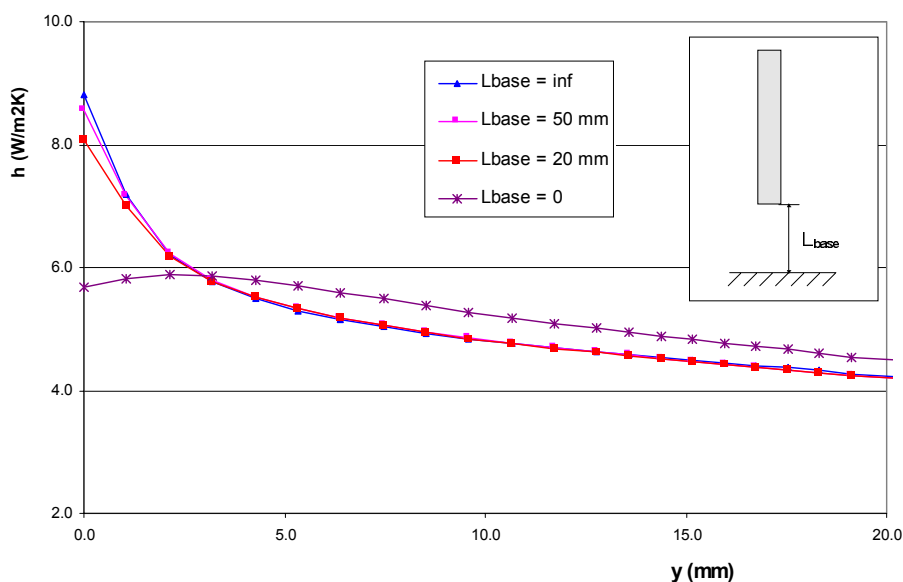


Figura 7 - Coeficiente de troca de calor por convecção (h) em função da altura (y) para diferentes distâncias placa-base ( $L_{base}$ )

Cogitou-se a influência das trocas radiantes, que poderia aquecer a base, provocando mudanças no fluxo de calor medido. Introduziu-se, então, as trocas radiantes no modelo computacional, estimando emissividades iguais a 0.1 para a placa vertical e 0.95 para o solo. Houve um acréscimo do coeficiente de troca, mas idêntico para todas as situações simuladas.

Como no modelo experimental a placa estava fixada a uma distância não muito grande de uma parede vertical, resolveu-se avaliar a influência da mesma. Os primeiros resultados mostraram uma forte influência da parede, conforme será apresentado nas seções seguintes.

### 8. Influência da distância placa-parede

No dispositivo experimental a placa foi fixada em suportes de acrílico a uma distância de 120 mm da parede, chegando a formar um canal. Cabe salientar que a superfície posterior da placa vertical estava isolada (poliestireno expandido com espessura de 21 mm). Mas conforme avaliado na seção 4, o acréscimo de temperatura do isolamento foi baixo, podendo ser considerado como isolante perfeito (condição de contorno adiabática). A Figura 8 mostra a variação do coeficiente de troca na borda de ataque frontal em função da distância entre parede e placa.

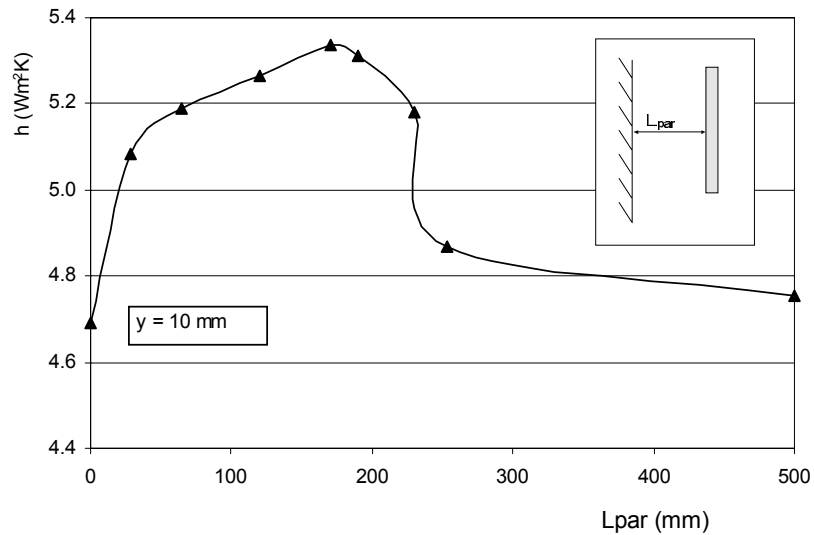


Figura 8 - Coeficiente de troca de calor por convecção (h) na borda de ataque frontal em função da distância placa-parede ( $L_{par}$ ) (avaliado a 10 mm da borda de ataque)

Pode-se notar que existe acréscimo do coeficiente de troca da borda de ataque frontal quando a placa está até 250 mm de distância da parede. Esse fenômeno é atribuído exclusivamente à força de sucção exercida pela pluma convectiva na região superior frontal da placa..

### 9. Efeito conjugado da parede e da base

Partiu-se, então, para uma análise conjunta do efeito da parede com o efeito do base. As Figuras 9 e 10 mostram resultados de uma simulação onde foi variado separadamente, e em seguida simultaneamente, as distâncias entre a placa e a parede ( $L_{par}$ ) e entre a placa e o base ( $L_{base}$ ).

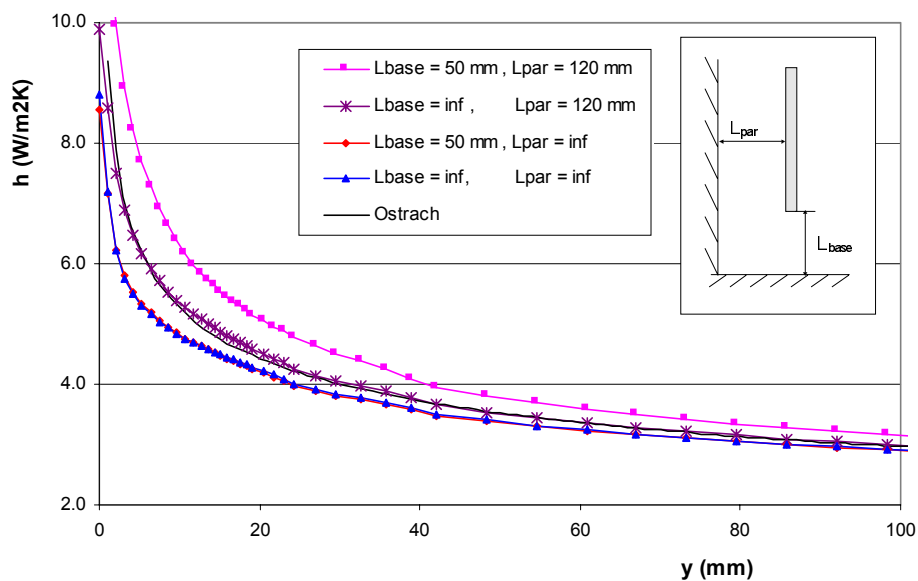


Figura 9- Coeficiente de troca de calor por convecção (h) em função da altura (y)

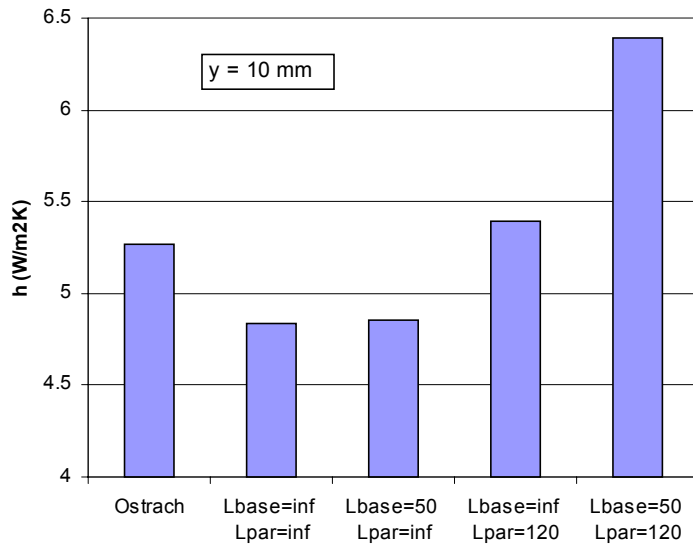


Figura 10- Coeficiente de troca de calor por convecção (h) para diferentes situações de  $L_{par}$  e  $L_{base}$

A terceira coluna representa a placa próxima da base ( $L_{base} = 50 \text{ mm}$  e  $L_{par} = \infty$ ), onde observa-se que não houve alteração do coeficiente de troca, permanecendo idêntico ao caso padrão (2ª coluna:  $L_{base} = \infty$  e  $L_{par} = \infty$ ) e levemente inferior ao proposto por Oostrach (1952) (1ª coluna). Já quarta coluna representa o caso de aproximação com a parede ( $L_{base} = \infty$  e  $L_{par} = 120 \text{ mm}$ ), onde houve um aumento de 11 % no coeficiente de troca. A última coluna apresenta o coeficiente de troca quando a placa é simultaneamente aproximada da parede e da base ( $L_{base} = 50 \text{ mm}$  e  $L_{par} = 120 \text{ mm}$ ). O coeficiente de troca atinge um valor **32 %** superior ao caso padrão, mostrando a ocorrência de forte interação entre o efeito da parede e do solo. As Figuras 11 e 12 vêm apresentar, respectivamente, o campo de velocidade e o campo de temperatura para o caso da placa distante 120 mm da parede e 50 mm do solo.

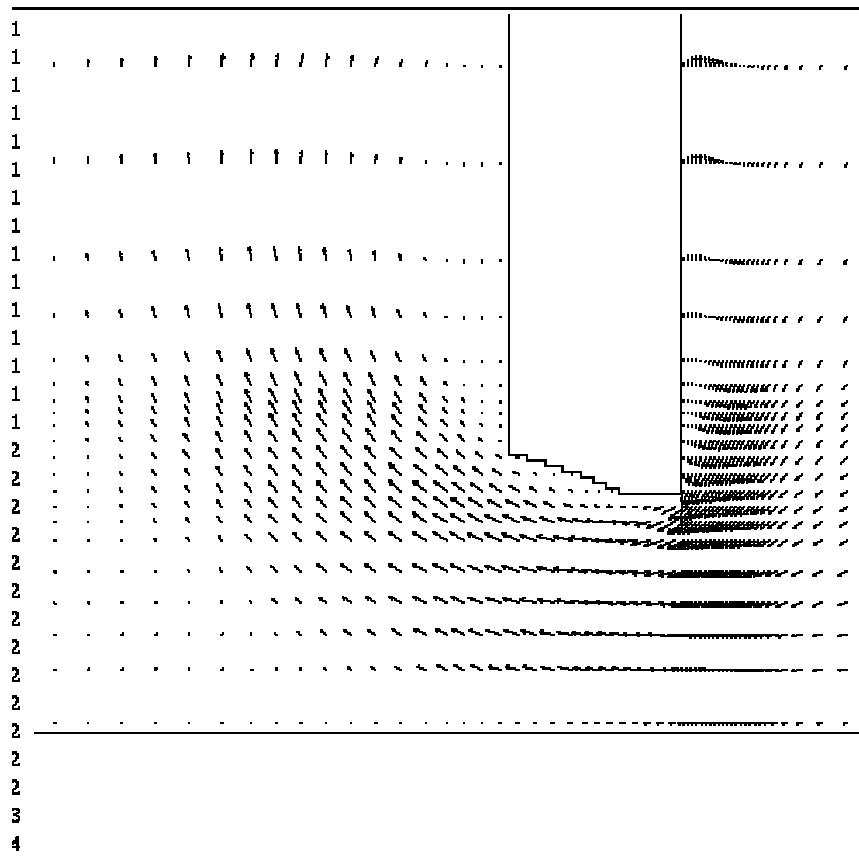


Figura 11 - Campo de velocidade para placa a 120 mm da parede e a 50 mm do solo

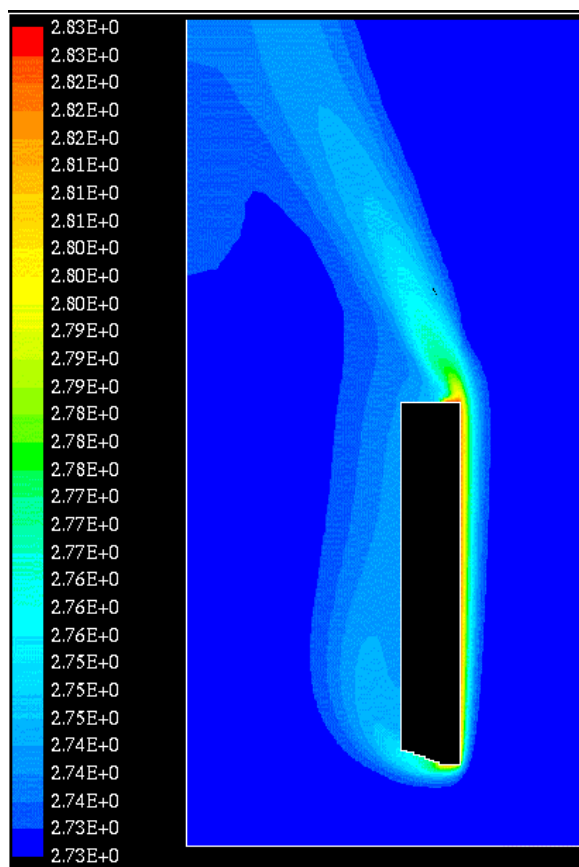


Figura 12 - Campo de temperatura para placa a 120 mm da parede e 50 mm do solo

Pode-se notar uma elevada sucção na região posterior, provocando um acentuado desvio nos campos de velocidade e temperatura. Na região da borda de ataque frontal placa chega a ocorrer uma inversão do sentido da velocidade. O resultado é um significativo acréscimo do coeficiente de troca, o que pode representar um aumento de rendimento para casos de trocadores de calor. Esses resultados vêm, então, corroborar e explicar o fenômeno observado experimentalmente.

## 10. Conclusão

Esse trabalho foi motivado por questionamentos advindos durante a experimentação em um placa plana vertical isotérmica onde foi analisado o coeficiente de troca de calor por convecção e os perfis de velocidade e de temperatura. Uma das questões foi relativa a uma variação do coeficiente de troca na região de entrada da placa quando esta era aproximada da base, passando por um ponto de máximo a uma distância de aproximadamente 50 mm. Como durante a experimentação não foi possível descobrir a causa desse fenômeno, partiu-se para uma análise numérica do dispositivo.

O modelo numérico foi inicialmente validado por comparação com resultados teóricos obtidos na literatura para o caso clássico da placa plana vertical isotérmica (Oostrach, 1952; Eckert e Drake, 1959). Já nessa primeira análise verificou-se que a concordância com os valores teóricos só era completamente obtida para uma placa isotérmica encastrada em um corpo isolante (ou à temperatura idêntica ao fluido quiescente).

Verificou-se que a espessura da placa atuava como um fator de diminuição do coeficiente de troca na borda de entrada. Mesmo em uma placa afilada - com espessura da borda igual à espessura de uma célula (1 mm) - foi verificado uma redução do coeficiente de troca.

Partiu-se, então, para a análise propriamente dita do problema, variando a distância placa-base. Contrariamente às expectativas, não foi detectado nenhum aumento do coeficiente de troca na borda de ataque com a redução da distância placa-base. O isolante na face posterior da placa e as trocas radiantes não mostraram-se capaz de modificar o quadro em questão. Como a placa estava fixada a uma certa distância da parede, partiu-se para uma avaliação completa do dispositivo. Constatou-se a existência de um ponto máximo de coeficiente de troca, fruto de um efeito de sucção na parte posterior da placa, induzida pela pluma do escoamento convectivo.

O passo seguinte foi analisar esse efeito conjugado com a distância placa-base. Constatou-se, então, que esse efeito era amplificado quando a placa estava a uma certa distância placa-base. Para o caso analisado ( $T_{\text{placa}} - T_{\infty} = 10 \text{ K}$ , dist. parede = 120 mm, dist. solo = 50 mm) houve um acréscimo de 30 % no coeficiente de troca em relação ao caso clássico, corroborando com os resultados experimentais. Esses resultados vieram então confirmar - e explicar - o fenômeno na experimentação. Esses fenômeno pode ser explorado para, por exemplo, aumentar o rendimento de trocadores de calor.



## 11. Referências

- COLLINS, R.E., DAVIS, C. A., DEY, C. J., ROBINSSON, J., TANG, Z. E TURNER, G. M, 1993,. - Measurement of local heat flow in flat evacuated glazing, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 36, pp.2553-2563.
- ECKERT E.R.G., 1950 - An introduction to the transfer of heat an mass. Ed. Mac Graw Hill Book Company Inc, New York.
- EL ALAMI M., 1994 - Contribution à l'étude thermique et dynamique des écoulementss le long d'une paroi non uniformément chauffée dans une cavité à grand nombre de Rayleigh. Thèse de l'INSA de Toulouse.
- GIBLIN R., 1974, - Transmission de la chaleur par convection naturelle. Ed. Eyrolles. Paris.
- GÜTHS, S., 1994, - "Anémomètre a Effet Peltier et Fluxmètre Thermique: Conception et Réalisation. Application à l'Etude de la Convection Naturelle". Thèse de Doctorat, Université d'Artois, França.
- GÜTHS, S., PHILIPPI, P.C., GAVIOT, E. E THERY, P., 1995, - "Um Transdutor de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial. Anais do XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica (COBEM), CDROM, Belo Horizonte.
- KHABBAZI A., EL ALAMI M., N'GUESSAN K., JAVELAS R., 1993, - Ecoulements le long d'une plaque verticale, non uniformément chauffée, dans une cavité. *Rev. Gén. Therm.*, pp. 696-704.
- LA PICA, A., RODONO, G. e VOLPES, R., 1993, -An experimental investigation on natural convection of air in a vertical channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 611-616.
- LASSUE, S., GÜTHS, S., LECLERCQ, D. & DUTHOIT, B., 1993, *Contribution to the experimental study of natural convection by heat flux measurement and anemometry using termoelétric effects* . Proceedings of the Third World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, USA, pp.831-838.
- MAHAJAN R.L. et GEBHART B., 1979, - An experimental determination of transition limits in a vertical natural convection flow adjacent to a surface, *J. Fluid Mech.*, Vol 91, pp. 131-154.
- MERGUI, S. e PENOT, F., 1996, - Analyse des vitesses et température de l'air en convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée a  $Ra = 1.69 \times 10^9$  . *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 40, pp.3427-3441.
- OSTRACH S., 1952, - "An analysis of laminar free convection flow and heat transfer about a flat plate parallel to the generating body force". NACA-TN2635.
- SAMMAKIA, B., CAREY, V. P, e GEBHART, B., 1995, - Measurements and calculations of transient mixed convection in air. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 28, pp.1837-1846.
- SCHMIDT E. et BECKMANN W., 1930, - Das temperatur un geschwindigkeitsfeld von einer warme abgebenden senkrechten platte bei naturllicher konvektion. *Tech. Mech. und Thermodyn.* Bd 1, Nr 10, Okt 1930 und Bd 1, Nr 11.
- TAINE J. et PETIT J.P., 1989, - Transferts Thermiques: Mécanique des fluides anisothermes. Dunod Université. p.345.
- THERY, P. et MARECHAL, J.C., 1980, - "Etude et caractérisation d'un nouveau fluxmètre calorifique". *J. of Physics E. Sci. Instruents*, vol. 13, pp. 858-865.
- TIMMA, J. e PADET, J., 1985, - Etude théorique du couplage convection-conduction en convection libre laminaire sur une plaque plane verticale. *Int. J. Heat Mass Transfer*, pp.1097-1104.
- VYNNYCKY, M. e KIMURA, S., 1996, - Conjugate free convection due to a heated vertical plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 39, pp 1067-1080.

## CONTRIBUTION IN THE STUDY OF THE NATURAL CONVECTION IN VERTICAL FLAT BOARD

**Saulo Güths**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT)  
 Departamento de Engenharia Mecânica  
 Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
 88040-900 Florianópolis / SC - Brezil  
 saulo@lmpt.ufsc.br

**Abstract.** In 1952 Simon Ostrach presented the solution to laminar flow in an isothermal vertical flat plate. This is a case that offers a chance to validate the instruments for comparison with theoretical analyses. The theoretical and experimental studies continue, aiming at to evaluate the behavior in conditions and diverse patterns. In the present work a numerical analysis of an experimentation in a isothermal vertical flat plate will be presented. The heat transfer convection coefficient " h " was determined using heat fluxmeter. This work is motivated by questionings happened during the experimentation, where a curious increase of the convection coefficient was detected when the plate was approach of the base. It will be presented the results of a numerical simulation where the influence of the thickness of the plate is evaluated, thickness of the posterior isolation, edge of attack, distance of the wall and the distance of the base.

**Keywords.** vertical flat plate, convection, heat flux