

# DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NUMA PLACA PLANA AQUECIDA NO INTERIOR DE UM TÚNEL DE VENTO COM ESCOAMENTO DE AR EM PARALELO

Evaluation of heat transfer coefficient under heat flat plate into a wind tunnel with parallel air flow

ANTONIETTI, A.J.  
STEMPKOWSKI, A.J.  
SEGATTI, F.  
SPASSIN, T. E. P.  
SILVA, C. V.

Recebimento: 14/05/2010 – Aceite: 21/07/2010

**RESUMO:** Considera-se, neste trabalho, que uma placa plana metálica seja aquecida a partir do efeito Joule e, sobre ela, se imponha um escoamento de ar frio em paralelo oriundo de um túnel de vento. Nesses casos, muito comuns em engenharia, a transferência de calor por convecção ocorre da superfície da placa para o fluido que está escoando, e o coeficiente local ou médio de convecção de calor,  $h$ , é muito importante para a determinação das taxas de transferência de calor em análises, onde este tipo de configuração está presente. Os dados da temperatura superficial local da placa e do fluido, assim como a potência elétrica introduzida para o aquecimento da placa, são obtidos experimentalmente. No entanto, o coeficiente de transferência de calor convectivo, o qual é um parâmetro empírico, tem sua determinação baseada na lei do resfriamento de Newton, ou então, através da utilização de parâmetros adimensionais correlacionados, tais como o número de Nusselt ( $\overline{Nu}$ ), Reynolds ( $Re$ ) e Prandtl ( $Pr$ ) do escoamento. Muitas correlações são obtidas na literatura, porém, devido às diferentes características dos escoamentos, a precisão dos resultados dessas correlações na determinação do coeficiente de convecção dependerá do tipo de aplicação a que se destinam. Sendo assim, neste trabalho, apresenta-se a determinação experimental de uma correlação empírica para a obtenção do número de Nusselt do escoamento de ar a temperatu-

ra ambiente sobre uma placa plana aquecida no interior do túnel de vento do Laboratório de Fenômenos de Transporte da URI – Campus de Erechim. O objetivo principal do estudo é o de comprovar a validade das equações encontradas na literatura para este tipo de configuração de escoamento em processos de transferência de calor e obter valores mais ajustados para o coeficiente convectivo em escoamentos com essas características no interior deste túnel, obtendo assim, uma correlação mais específica e que possa ser aplicada em experimentos de transferência de calor no equipamento.

**Palavras-chave:** Transferência de Calor. Placa Plana. Escoamento Paralelo. Túnel de Vento.

**ABSTRACT:** It was considered in this work that a metal flat plate has been heated from the Joule effect, and under it was imposed a cold air flow in parallel from the wind tunnel. In these cases, very common in engineering, heat transfer by convection occurs from the surface of the plate to the flow that is leaking, and the local or average coefficient of heat convection,  $h$ , is very important for determination of the heat transfer rate in analysis where this kind of configuration is present. Data from local surface temperature of the plate and the fluid flow, as well as the electric power introduced to the heated plate are obtained experimentally. However, the coefficient of convective heat transfer, an empirical parameter, has its determination based on cooling Newton's law, or by using dimensionless parameters correlated, such as the Nusselt number ( $Nu$ ), Reynolds ( $Re$ ) and Prandtl ( $Pr$ ) of the fluid flow. Many correlations were obtained at literature, however, due to different flow characteristics the accuracy of the results of these correlations to determination of the heat transfer coefficient depends on the kind of application intended. Thus, this work presents the experimental determination of the empirical correlation aim to obtain the Nusselt number of the cold air flow under a heated flat plate into the wind tunnel of Transport Phenomena Laboratory of the URI - Campus Erechim. The main goal of this work is to verify the agreement of the equations found at the literature for this kind of fluid flow where heat transfer occurs, and get more adjusted values to the heat convection coefficient for flows with these characteristics into the wind tunnel, thereby obtaining a more specific correlation, and that can be used in experiments of heat transfer in such equipment.

**Keywords:** Heat Transfer. Flat Plate. Parallel Flow. Wind Tunnel.

## Introdução

O termo convecção é usado para descrever a transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento sobre esta superfície. A convecção inclui transfe-

rência de energia pelo movimento global do fluido – advecção - e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido - difusão (INCROPERA e DE WITT, 2008). Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor. A contribuição, devido ao movimento

molecular aleatório, é dominante próximo a superfície, onde a velocidade do fluido é baixa. A contribuição do movimento global do fluido origina-se no fato de que a espessura da camada-limite cresce à medida que o escoamento progride ao longo da superfície na direção desse mesmo escoamento. Nesse sentido, o calor que é conduzido para o interior desta camada é arrastado na direção do escoamento, sendo, posteriormente, transferido para o fluido que se encontra no exterior da camada-limite.

Qualquer estudo da convecção se reduz basicamente a um estudo de procedimentos, pelos quais o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h$ , pode ser determinado. O  $h$  depende das condições da camada limite, as quais são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

A convecção local e/ou total de calor é de capital importância em qualquer problema de transferência de calor onde este fenômeno está presente. No entanto, como principal problema da convecção, tem-se a determinação dos coeficientes convectivos, local ( $h$ ) e/ou médio ( $\bar{h}$ ). Na literatura, é possível encontrar uma enorme gama de possibilidades de se calcular os coeficientes de convecção a partir de correlações empíricas, mas devido às especificidades de cada situação para a qual essas correlações foram determinadas, sua aplicação em problemas de transferência de calor pode fornecer diferentes resultados para um mesmo caso de estudo. É por esse motivo que a determinação desses coeficientes é vista como o grande problema da convecção. Contudo, o problema não é simples, pois, além de dependerem de várias propriedades do fluido, tais como densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico, os coeficientes são funções da geometria da superfície e das condições do escoamento, que pode ser laminar ou turbulento.

Essa multiplicidade de variáveis independentes resulta do fato de que a transferência por convecção é influenciada pelas camadas-limite que se desenvolvem sobre a superfície. Inúmeros trabalhos são encontrados na literatura, os quais realizaram estudos sobre a determinação de correlações para a obtenção do coeficiente de convecção sobre diferentes geometrias e condições de escoamento. Aziz (2009) investigou o escoamento na camada limite sobre uma plataforma plana, considerando condições de fluxo de calor e de deslizamento constantes na superfície. Como a temperatura da superfície da placa varia ao longo da direção do escoamento, a dinâmica e as equações de energia são acoplados devido à presença do gradiente de temperatura ao longo da superfície da placa. Datta, Subhashini e Ravindran (2008) apresentaram uma solução numérica de um escoamento constante de convecção mista sobre uma placa plana horizontal, na presença de superfície de transferência de massa (sucção ou injeção), em que esta é obtida pela lei da potência, considerando, também, a variação da temperatura de superfície. Os resultados numéricos são relatados de modo a explicar os efeitos do número de Prandtl na temperatura da superfície, nos parâmetros de transferência de massa (sucção ou injeção), perfis de temperatura e nos coeficientes de transferência de calor.

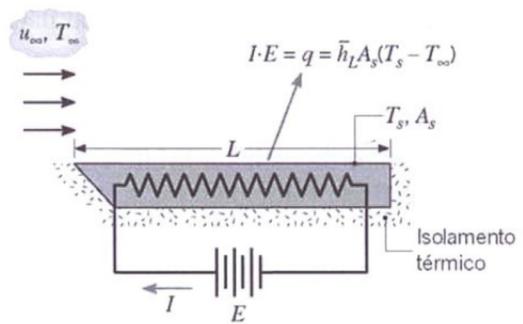
O trabalho de Myers (2009) trata do desenvolvimento das camadas limite térmica e dinâmica sobre uma placa plana aquecida. O problema é analisado usando as soluções de similaridade dinâmica integral e as equações de energia, considerando uma forma de aproximação pelo Método do Balanço de Calor Integral. As soluções de similaridade são usadas para validar o novo método de aproximação. Esta nova técnica é aplicada à camada limite térmica, onde uma solução por semelhança só pode ser obtida para o caso de  $n = 1$ .

Sartori (2005) apresenta um trabalho, no qual são feitas comparações entre diferentes equações conhecidas do coeficiente de transferência de calor por convecção para o escoamento de ar forçado sobre superfícies planas, e, em particular, sobre os coletores solares, com o objetivo de chegar a um consenso sobre qual dessas equações apresentam maior precisão. O referido trabalho mostra, através da aplicação de princípios básicos, precisões diferentes para as equações consideradas. A equação consensual, que vem da teoria da camada limite e leva em consideração escoamentos turbulentos e laminares, bem como a direção do vento e da decadência do coeficiente de convecção sobre a superfície, também mostra concordância com diversos trabalhos experimentais e tende a representar mais precisamente a transmissão de calor real de/para qualquer superfície plana submetido à convecção forçada. Em outro trabalho, Kendoush (2008) propõe soluções analíticas para a transferência de calor e de massa de escoamentos de fluidos sobre uma placa plana isotérmica. Neste mesmo trabalho assumiu-se que o escoamento era laminar, viscoso e irrotacional. Dessa forma, a avaliação dos fenômenos físicos, a determinação de parâmetros de transferência de calor associados ao escoamento sobre a superfície exterior de uma placa plana aquecida e a determinação dos coeficientes convectivos são estudados experimentalmente para diferentes condições de escoamento de ar à temperatura ambiente no interior de um túnel de vento. A abordagem experimental empírica envolve a execução de medições de parâmetros relacionados à transferência de calor sob condições controladas em laboratório e a posterior correlação desses dados experimentais em termos de parâmetros adimensionais apropriados. Este é um problema de convecção forçada com diferentes velocidades para o escoamento e sem mudança de fase no fluido, a fim de obter uma correlação que caracterize, para

as condições de escoamento, a transferência de calor sobre a placa no interior do túnel de vento instalado no Laboratório de Fenômenos de Transporte da URI - Campus de Erechim. Este estudo tem o objetivo de estabelecer uma correlação específica para a determinação do coeficiente de transferência de calor em superfícies planas aquecidas nesse túnel.

## Modelo físico

A maneira pela qual uma correlação para a transferência de calor por convecção pode ser obtida experimentalmente está ilustrada na Fig. 1.



**Figura 1** - Experimento para a medição do coeficiente de transferência de calor por convecção médio  $\bar{h}_L$  (INCROPERA e DE WITT, 2008).

O coeficiente médio de transferência de calor por convecção pode ser determinado através da lei do resfriamento de Newton para a potência que é dissipada pela resistência elétrica na superfície da placa, considerando-se que as demais superfícies da placa sejam isoladas:

$$P_{elet} = I \cdot E = q = \bar{h}_L A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (1)$$

onde  $P_{elet}$  é a potência elétrica,  $I$  é a intensidade de corrente,  $E$  é a tensão elétrica,  $q$  é

a taxa de transferência de calor e  $A_s$  é a área superficial da placa.

Os números de Reynolds,  $Re$ , e Prandtl,  $Pr$ , caracterizam a natureza do escoamento para um determinado fluido e são estimados através das equações

$$Re_L = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (2)$$

e

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_f} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3)$$

mas quais  $\rho$  é a massa específica,  $V$  é a velocidade do escoamento,  $L$  o comprimento da placa,  $\mu$  a viscosidade cinemática,  $\nu$  a viscosidade dinâmica,  $c_p$  o calor específico,  $\alpha$  a difusividade térmica e  $k_f$  a condutividade térmica do fluido.

O crescimento da camada-limite turbulenta é muito mais rápido que o crescimento da camada limite laminar. Fato este que torna o crescimento do coeficiente de atrito mais gradual para a camada-limite laminar. Para o escoamento turbulento, o desenvolvimento da camada-limite é fortemente influenciado por flutuações aleatórias no fluido, e não pela difusão molecular (INCROPERA e DE WITT, 2008). Dessa forma, o crescimento relativo da camada-limite não depende do valor de  $Pr$ .

A melhor mistura causa um crescimento mais rápido da camada-limite turbulenta, quando comparado ao da camada-limite laminar fazendo com que ela tenha maiores coeficientes convectivos. O número de Nusselt médio ( $\overline{Nu}$ ) relaciona o coeficiente médio de transferência de calor por convecção ( $\overline{h}$ ) e o comprimento da placa ( $L$ ) pela condutividade térmica do fluido ( $k_f$ ), como segue

$$\overline{Nu} = \overline{h}L/k_f \quad (4)$$

Tem-se como base teórica, para a análise da transferência de calor em placa plana com fluxo térmico constante, que as equações de correlação, elaboradas de forma empírica, são diferentes para cada tipo de escoamento, segundo a camada-limite, laminar ou turbulenta. Na literatura, são apresentadas diferentes correlações para os números de Nusselt médios, em condições de camada-limite laminar ou turbulenta. Segundo Incropera e De Witt (2008), considerando fluxo térmico constante sobre a placa, tem-se para um escoamento laminar sobre a superfície dessa placa:

$$\overline{Nu}_L = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad \left[ \begin{array}{l} Pr \geq 0,6 \\ Re_L \leq 5 \times 10^5 \end{array} \right] \quad (5)$$

A correlação utilizada, levando-se em consideração o diâmetro do túnel e um escoamento interno, confinado por paredes, é apresentada abaixo para escoamento turbulento e leva em consideração o coeficiente de atrito das paredes do mesmo

$$\overline{Nu}_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)^{1/4} (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/4} (Pr^{1/3} - 1)} \quad \left[ \begin{array}{l} 2000 \geq Pr \geq 0,5 \\ 3000 \leq Re_L \leq 5 \times 10^6 \end{array} \right] \quad (6)$$

onde observa-se, também, a faixa de números de Prandtl e Reynolds.

## Aparato Experimental

Em um túnel de vento com variações de diâmetro ao longo do comprimento, projeta-se o aparato experimental para obtenção dos parâmetros de transferência de calor por

convecção de uma placa plana aquecida para o escoamento forçado de ar à temperatura ambiente. O aquecimento da placa é feito através de resistências elétricas internamente instaladas na placa. Para que o calor seja, preferencialmente, transmitido pela superfície superior da placa que está no interior do túnel de vento, um isolamento térmico é instalado nas demais superfícies.

Na seção correspondente à parte final do túnel, faz-se um corte de 150 mm de comprimento por 20 mm de largura para a inserção da placa plana, de modo que esta possa ser analisada sem que interfira no escoamento principal de ar. A escolha da placa depende do material a ser analisado para determinadas velocidades de escoamento. No caso, a escolha de uma placa de aço 1010 de condutividade térmica  $k$  igual a 63,9 W/m.K é adequada por ser semelhante ao material de que o duto é composto. A resistência elétrica utilizada dissipa 25 W de potência elétrica sobre a superfície inferior da placa, sendo que a placa também está isolada eletricamente no interior de um duto de material isolante capaz de impedir que a eletricidade seja transmitida além da resistência.

O suporte rígido para a locação da resistência, da placa plana e dos termopares para a medição de temperaturas é confeccionado em baquelite. A baquelite é um isolante de baixa eficiência na retenção térmica e dissipa muito calor para o ambiente, sendo necessária a utilização de um isolante térmico que permita apenas uma perda mínima de energia para o meio externo. Assim, um material isolante térmico com uma determinada capacidade de isolamento deve também ser utilizado para minimizar a perda de calor das demais superfícies da placa para o ambiente. Em função de suas propriedades isolantes e mecânicas, a lã de rocha é o material isolante que melhor satisfaz a necessidade de custo e eficiência para utilização no aparato. Como envoltório da lã de rocha, para fins de proteção deste isolante e

segurança operacional, utiliza-se isopor que também auxilia na isolação externa.

A montagem do aparato foi feita de modo que a inserção da placa não interfira no escoamento e a colocação da resistência propicie sobre a placa um aquecimento uniforme quando exposto ao ar quiescente sobre sua superfície. As Figs. 2 e 3 mostram as etapas da montagem e funcionamento do aparato.

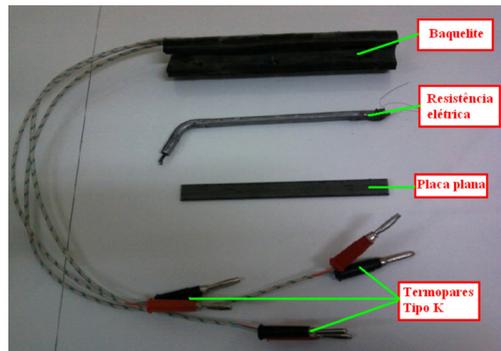


Figura 2 - Peças do sistema antes da montagem.

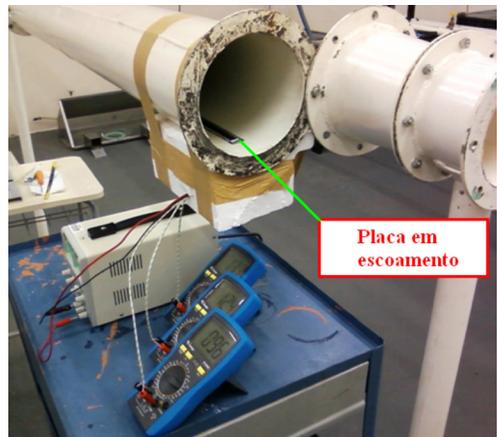
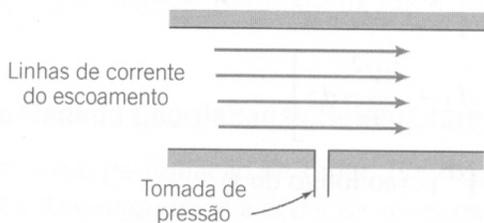


Figura 3 - Placa em escoamento paralelo.

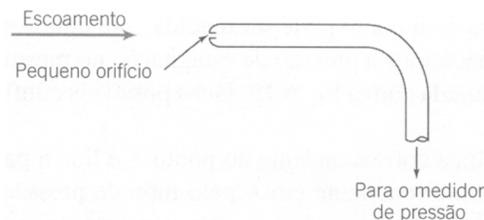
## Determinação das velocidades do escoamento no interior do túnel de vento

A etapa seguinte consiste em determinar a velocidade média do escoamento no duto a

fim de determinar o número de Reynolds e o uso correto das correlações. A determinação das velocidades é feita através da tomada das pressões estática ( $p$ ) e de estagnação ( $p_0$ ) (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2006), usando-se a técnica de medição baseada no tubo de Pitot. A pressão estática é obtida pela tomada de pressão na parede do duto (Fig. 4a) e a pressão de estagnação é obtida através de um tubo curvo orientado com a direção do escoamento (Fig. 4b), o qual é inserido no interior do túnel de vento através de um orifício na superfície do túnel.



(a)



(b)

**Figura 4** – (a) Tomada de pressão estática na parede; (b) Tomada de pressão de estagnação (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2006).

A pressão é medida em mH<sub>2</sub>O (diferença de pressão por altura de coluna d’água) que pode ser convertida em Pascal (N/m<sup>2</sup>), através da equação da diferença de pressão

$$\Delta p = \rho gh \quad (7)$$

em que  $g$  é a força da gravidade e  $h$  é a altura da coluna d’água. A velocidade média,  $V_m$ , é calculada através da equação

$$V_m = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho_{ar}}} \quad (8)$$

As temperaturas na face da placa são obtidas através de três termopares tipo K ligados a multímetros que convertem o sinal do termopar numa medida de temperatura. Considera-se que o aquecimento da placa seja uniforme, de modo que as temperaturas indicam resultados quase idênticos. A fim de corrigir pequenas variações nas leituras, é feita uma média entre as temperaturas obtidas.

### Considerações, propriedades termofísicas e medições

Todas as propriedades que aparecem nas correlações anteriores são avaliadas na temperatura de filme, assumida, para efeitos de simplificação, igual a 350K, e são apresentadas no Quadro 1 abaixo.

Prop. das correlações (350K)		
$k_{ar} =$	0,03	W/m.K
$\mu_{ar} =$	2,08E-05	kg/m.s
$\rho_{ar} =$	0,995	kg/m <sup>3</sup>
$Pr_{ar}$	0,7	
Outras Propriedades (300K)		
$\rho_{H_2O} =$	999	kg/m <sup>3</sup>
$g =$	9,8	m/s <sup>2</sup>

**Quadro 1** – Propriedades utilizadas na determinação dos parâmetros de cálculo (INCROPERA e DE WITT, 2008).

O sistema de aquecimento é capaz de elevar a temperatura da superfície da placa próximo a 115°C, dissipando uma potência de 10W diretamente na face inferior dessa placa. Perdas de calor através do isolamento térmico e das paredes do duto foram desconsideradas em função de serem muito

pequenas. Os dados obtidos do equipamento são apresentados no Quadro 2.

Dimensões da Placa			Sistema de Aquecimento		
$L =$	0,08	m	Tensão	15,6	V
$W =$	0,01	m	Resistência	26	$\Omega$
$A =$	0,0008	$m^2$	Corrente	0,6	A
Diâmetro do Duto			$q =$	9,36	W
$D =$	0,14	m	$q'' =$	11700	$W/m^2$

Quadro 2 - Dados do aparato experimental.

A fim de se obter uma correlação para o Nusselt do túnel em função do número de

Reynolds, as medições foram realizadas para as cinco velocidades diferentes no túnel de vento, as quais são apresentadas no Quadro 3 a seguir, como uma função das frequências (Hz) em que o túnel opera. Para determinada frequência de operação é levantada a variação de pressão do escoamento e a diminuição das temperaturas na superfície da placa. O erro estimado nos dados de temperatura se encontra em  $+ 2^\circ\text{C}$ .

Dados Medidos no Aparato						
Dados	1 (10Hz)	2(20Hz)	3(30Hz)	4(40Hz)	5(50Hz)	Unidade
$h0 =$	0,0015	0,002	0,003	0,0045	0,006	$m_{H_2O}$
$p0 =$	14,6853	19,5804	29,3706	44,0559	58,7412	$N/m^2$
$h =$	0	0	0	0	0	$m_{H_2O}$
$p =$	0	0	0	0	0	$N/m^2$
$T_1$	109	101	95	90	86	$^\circ\text{C}$
$T_2$	109	101	95	90	86	$^\circ\text{C}$
$T_3$	108	101	95	90	86	$^\circ\text{C}$
$T_{m\acute{e}dia}$	108,667	101	95	90	86	$^\circ\text{C}$
$T_{or}$	18	18	18,5	19	20,1	$^\circ\text{C}$
$T_{placa}$	108,667	101	95	90	86	$^\circ\text{C}$
$T_{filme}$	63,333	59,5	56,75	54,5	53,05	$^\circ\text{C}$

Quadro 3 - Dados obtidos no aparato experimental.

Observando os dados de temperatura, verifica-se a presença de uma pequena variação entre os resultados dos três termopares para primeira leitura. Essa diferença pode ser devida à imprecisão do termopar 3, que pode não estar medindo corretamente a temperatura da placa. A Fig. 5 mostra os pontos de localização de cada termopar.

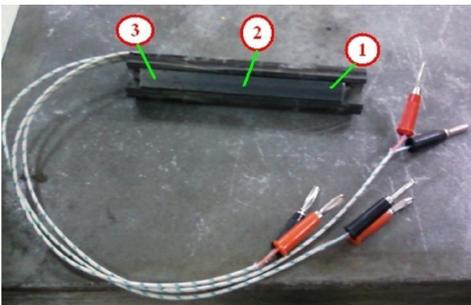


Figura 5 - Pontos onde estão colocados os termopares.

## Resultados

A análise experimental da simulação de um escoamento externo forçado utilizando um túnel de vento é apresentada no Quadro 4. Ao calcular o número de Reynolds para o escoamento no duto, observou-se que os valores alcançados demonstravam:

- para o escoamento interno no duto que o valor de  $Re$  é turbulento, ou seja, superior a 2300.

- para condição de escoamento externo sobre placa plana que o valor de  $Re$  é laminar, ou seja, inferior a  $5 \times 10^5$ .

Aplicando as correlações descritas na literatura, Eqs. (5) e (6), os resultados obtidos são os apresentados no Quadro 5, no qual  $Nu_D$

e  $Nu_L$ ,  $Re_D$  e  $Re_L$  referem-se ao escoamento turbulento interno em relação ao túnel de vento e laminar externo em relação a superfície da placa, respectivamente.

O número de Nusselt foi calculado da mesma forma utilizando os valores de Reynolds encontrados para o escoamento sobre a placa para as duas situações. Ao calcular a função logaritmo para  $\overline{Nu}$  e  $Re$ , foi possível

a construção de um gráfico, em que uma linha de tendência apontou a correlação para o escoamento analisado. A curva encontrada aproximou-se da literatura para o escoamento interno turbulento. A influência das paredes no fluxo de ar modifica as condições de análise sobre a placa quando considera-se a mesma sobre escoamento externo.

Cálculos						
Dados	1 (10Hz)	2(20Hz)	3(30Hz)	4(40Hz)	5(50Hz)	Unidade
$Vm =$	5,433	6,274	7,684	9,410	10,866	m/s
$T_{ar}$	291	291	291,5	292	293,1	K
$T_{placa}$	381,667	374	368	363	359	K
$dT = T_{placa} - T_{ar}$	90,667	83	76,5	71	65,9	K
$h = q''/dT$	129,044	140,964	152,941	164,789	177,542	W/m <sup>2</sup> .K
$Nu_{L,médio}$	344,118	375,904	407,843	439,437	473,445	
$Log(Nu_{L,médio})$	2,537	2,575	2,610	2,643	2,675	
$Re_L$	20771,947	23985,379	29375,970	35978,068	41543,895	Laminar
$Re_D$	36350,908	41974,413	51407,947	62961,619	72701,815	Turbulento
$Log(Re_L)$	4,317	4,380	4,468	4,556	4,619	
$f$	0,052	0,05	0,048	0,0478	0,0475	(e/D)=0,01

Quadro 4 - Resultados encontrados para os parâmetros de transferência de calor analisados.

Segundo a literatura					
$Re_L$	20771,947	23985,379	29375,970	35978,068	41543,895
$Re_D$	36350,908	41974,413	51407,947	62961,619	72701,815
$Nu_{L,médio}$	84,971	91,308	101,049	111,829	120,168
$Nu_{D,médio}$	205,341	227,629	267,377	327,112	375,848
$Log(Nu_{L,médio})$	1,929	1,961	2,005	2,049	2,080
$Log(Nu_{D,médio})$	2,312	2,357	2,427	2,515	2,575

Quadro 5 - Resultados das correlações apresentadas na literatura em função do número de Reynolds encontrado para escoamento externo sobre a placa e interno ao túnel de vento.

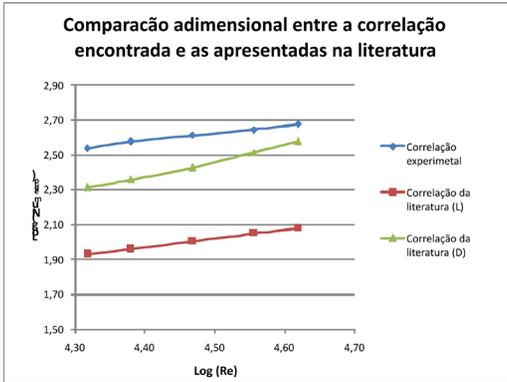
A correlação encontrada para o escoamento de ar sobre placa plana em fluxo confinado é apresentada na Eq. (9)

$$\overline{Nu}_L = 4,883Re_L^{1/2}Pr^{1/3} \quad (9)$$

onde, utiliza-se o Reynolds obtido sobre a placa.

A Fig. 6 mostra a comparação entre a curva encontrada experimentalmente e as curvas apresentadas na literatura para escoamento

laminar sobre a placa (Eq. (5) e para escoamento interno turbulento (Eq. (6)).



**Figura 6** - Comparação adimensional entre correlações da transferência de calor por convecção.

## Conclusões

O objetivo pelo qual se fez a experiência foi o de determinar uma correlação para o  $\overline{Nu}$  no interior do túnel de vento do Laboratório de Fenômenos de Transporte da URI -

Campus de Erechim, a fim de que se tenham dados específicos para o coeficiente de convecção  $\overline{h}$ , considerando o caso de escoamento paralelo a uma superfície plana aquecida e que esta correlação possa servir de base para experimentos futuros, nos quais a transferência de calor por convecção está presente. A correlação encontrada aproximou-se da literatura para o escoamento interno turbulento, indicando que a influência das paredes do túnel sobre o fluxo de ar modifica as condições de análise sobre a placa quando considera-se a mesma sobre escoamento externo, sem a interferência de paredes. Assim, a análise feita neste trabalho para um escoamento sobre uma placa plana aquecida pode ser expandida para outros casos de estudo, onde existe um escoamento turbulento na corrente principal do túnel, e pretendendo-se, com isso, avaliar a troca de calor por convecção em determinados objetos, que mantêm as mesmas características de um escoamento sobre uma placa plana aquecida.

## AUTORES

Anderson José Antonietti – Acadêmico de Engenharia Industrial Mecânica pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI - Campus de Erechim, atualmente é bolsista pesquisador pelo CNPq no projeto de Modelagem dos Processos de Combustão na própria universidade. E-mail: andernietti@yahoo.com.br

Ademir José Stempkowski – Acadêmico de Engenharia Industrial Mecânica pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI - Campus de Erechim.

Fábio Segatti – Acadêmico de Engenharia Industrial Mecânica pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI - Campus de Erechim.

Tiago Ernani Postal Spassin – Acadêmico de Engenharia Industrial Mecânica pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI - Campus de Erechim.

Cristiano Vitorino da Silva – Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil, atualmente é professor e coordenador do Curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI – Campus de Erechim.

## REFERÊNCIAS

- AZIZ, A. **Hydrodynamic and thermal slip flow boundary layers over a flat plate with constant heat flux boundary condition**. Commun Nonlinear Sci. Numer. Simulat., Elsevier, 2009.
- DATTA, P., SUBHASHINI, S.V., RAVINDRAN, R. **Influence of surface mass transfer on mixed convection flows over non-isothermal horizontal flat plates**. Applied Mathematical Model, Elsevier, 2008.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2006.
- INCROPERA, F. P., DE WITT. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- KENDOUSH, A. A. **Theoretical analysis of heat and mass transfer to fluids flowing across a flat plate**. International Journal of Thermal Sciences, Elsevier, 2008.
- MYERS, T.G.. **An approximate solution method for boundary layer flow of a power law fluid over a flat plate**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier, 2009.
- SARTORI, E. **Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces**. Solar Energy, Elsevier, 2005.

