



ATRITO SUPERFICIAL SOBRE PLANO POROSO PERMEÁVEL

Vlassov D.

Universidade Federal do Paraná, UFPR. Endereço: DEMEC, Centro Politécnico, Caixa Postal 19011, Curitiba – PR, CEP 81531-990. E-mail: vlassov@demec.ufpr.br

Resumo. *Este trabalho apresenta resultados de ensaios experimentais de camada limite turbulenta, isotérmica sobre placa porosa com transferência de massa superficial uniforme. A experiência foi realizada em um túnel de vento subsônico. O ar secundário foi injetado através da parede porosa na camada limite turbulenta. A placa porosa foi feita com uma base de grades finas de aço inoxidável pelo método de laminação a quente em meio de vácuo. A partir de perfis de velocidade longitudinal medidos na sub-camada viscosa foram determinadas tensões superficiais e coeficientes de atrito superficial ao longo da placa sob a variação da velocidade do ar insuflado. Os coeficientes de atrito superficial determinados através dos perfis de velocidade foram confirmados com a medição direta do arrasto da placa porosa. Os resultados dos ensaios demonstram que a injeção transversal do ar na camada limite turbulenta diminui acentuadamente o atrito superficial.*

Palavras-chave: *camada limite, insuflação, material poroso, termoanemometria, atrito superficial.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de teoria de camada limite turbulenta em condições da insuflação através das paredes porosas e de métodos da proteção térmica, elaboração de seguros modelos matemáticos e de simulação numérica exigem conhecimentos profundos de fenômenos de transporte turbulento da energia e da massa na camada limite.

A insuflação de fluidos através de parede porosa exerce uma forte influência sobre desenvolvimento de camada limite (Kutateladze S.S., 1990). Em particular, a insuflação de ar através de paredes porosas de perfis aerodinâmicos pode ser usada para controlar a sustentação e reduzir o arrasto. O efeito principal da insuflação sobre a camada limite é a diminuição de atrito superficial. É interessante comparar, em condições de mesmo modelo, vários métodos de determinação de coeficiente de atrito. Isto permite verificar viabilidade de hipóteses colocadas em base de teorias de camada limite turbulenta em condições de insuflação através de parede porosa permeável.

Na investigação de escoamentos viscosos tem grande importância métodos de medição direta de forças de resistência. Um dos métodos é o de “elemento flutuante”. Neste caso um dos elementos de superfície é montado em uma balança aerodinâmica e durante o escoamento do ar no túnel de vento mede-se a força de atrito (arrasto). O emprego de métodos diretos de medição do atrito permite, sem hipóteses teóricas relevar o efeito integral da insuflação sobre o atrito superficial.

2. PREMISSAS TEÓRICAS

Na prática experimental são usados vários métodos de determinação de coeficientes de atrito superficial. Da teoria de camada limite turbulenta segue que a influência de tensões de cisalhamento é mais sensível na sub-camada viscosa que é diretamente aderida a parede. A espessura da sub-camada viscosa δ_v na parede impermeável faz parte só de 0,001 a 0,01 da espessura total da

camada limite δ . Em condições de insuflação as tensões tangenciais viscosas são determinadas por Lei de Newton $\tau_v = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)$. Quando a placa porosa tem a insuflação uniforme, pois $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$

a formula da tensão de cisalhamento passa ter a forma mais conhecida $\tau_v = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)$, em particular para superfícies impenetráveis.

Para parede impermeável é considerado que na sub-camada viscosa as tensões de cisalhamento são maiores que as tensões turbulentas de Reynolds $\tau_t = -\rho \overline{u'v'}$, pois $\tau_v > \tau_t$.

onde: μ viscosidade dinâmica,
 U componente longitudinal da velocidade,
 y coordenada vertical,
 ρ densidade,
 u' componente longitudinal de flutuação turbulenta da velocidade,
 v' componente vertical de flutuação turbulenta de velocidade,
 $\overline{u'v'}$ valor médio de produto instantâneo das componentes de flutuações turbulentas de velocidades em direção de eixos x e y .

Dessa suposição segue a forma linear do perfil da velocidade longitudinal U na sub-camada viscosa. Em coordenadas adimensionais a forma linear do perfil universal da velocidade longitudinal é apresentado pela igualdade

$$U^+ = y^+, \quad (1)$$

onde: $U^+ = \frac{U}{U_\tau}$, $y^+ = \frac{y U_\tau \rho}{\mu}$;

U_τ - velocidade de atrito calculada pela fórmula $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$.

Medindo velocidade U na sub-camada viscosa e construindo perfil $U = f(y)$ determina-se gradiente de velocidade e o coeficiente de atrito superficial local C_f que é calculado

$$\frac{C_f}{2} = \frac{\tau_w}{\rho U_\infty^2} \quad (2)$$

onde: $\tau_w = \tau_v(y=0)$ - tensão superficial na parede;

U_∞ - velocidade de escoamento fora de camada limite.

O problema principal desse método de determinação de C_f é a grande dificuldade de medir as velocidades na sub-camada viscosa devido a pequena espessura dela. Esse problema pode ser resolvido só empregando termoanemómetro de fio quente que foi usado nesse trabalho.

Outro método que é frequentemente usado para determinar o coeficiente de atrito, é o método indireto, baseado em hipótese do Prandtl. Segundo ela, no perfil da velocidade no núcleo turbulento da camada limite existe um trecho logarítmico. Partindo de suposições que no núcleo turbulento as tensões turbulentas são iguais às tensões de cisalhamento na parede $\tau_t = \tau_w$ e apresentando as

tensões turbulentas como $\tau_t = \rho \chi^2 y^2 \left(\frac{dU}{dy} \right)^2$, (onde χ é uma constante determinada de experiência, $\chi=0,4$), o perfil da velocidade em coordenadas adimensionais é apresentado

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \frac{1}{\chi U_\infty} \lg \bar{y} + \text{Const} \quad (3)$$

onde: \bar{U} - velocidade relativa, $\bar{U} = \frac{U}{U_\infty}$;

\bar{y} - coordenada relativa vertical, $\bar{y} = \frac{y}{\delta}$.

Construindo perfil da velocidade medida na camada limite em coordenadas $\bar{U} = f(\lg \bar{y})$, procura-se um trecho linear no perfil, determina-se a inclinação deste trecho e a partir de valor da inclinação de Equação (3) determina-se a tensão de cisalhamento na parede τ_w e pela Equação (2) o coeficiente de atrito.

3. DESCRIÇÃO DE MODELO, TÚNEL E METODOLOGIAS USADAS.

3.1. Modelo e túnel de vento

O modelo experimental apresentou uma placa de comprimento total de 2530 mm e de largura de 400 mm. A placa foi constituída de um trecho inicial impermeável de comprimento de 1000 mm; de um trecho de placa porosa permeável de comprimento de 1030 mm e de um trecho traseiro impermeável de comprimento de 500 mm. O comprimento de trecho inicial foi escolhido para ter na entrada da placa porosa uma camada limite turbulenta desenvolvida, $Re \cong 10^6$. Para o mesmo efeito no início do trecho foi instalado um turbulizador.

A placa porosa foi fabricada por método de laminagem a quente em vácuo de um pacote de grades feitas de aço inoxidável (tecidos de aço). A superfície de trabalho da placa porosa foi feita de uma camada das grades de arame de diâmetro de 0,055 mm com a célula de 0,071 x 0,071 mm. O uso de grades finas permitiu adquirir mínima rugosidade da superfície de trabalho de placa porosa e pequenos tamanhos de poros, pois a placa porosa foi considerada hidraulicamente lisa. A porosidade da placa porosa foi de 11,8%. O valor médio dos poros é de 15 μ m. A uniformidade de insuflação do ar pela superfície da placa porosa variou na faixa de $\pm 5\%$.

A placa porosa foi soldada em cima de uma caixa de altura de 80 mm (veja Figura (1)). Dentro da caixa, foi montado um sistema de distribuição uniforme do ar secundário de insuflação.

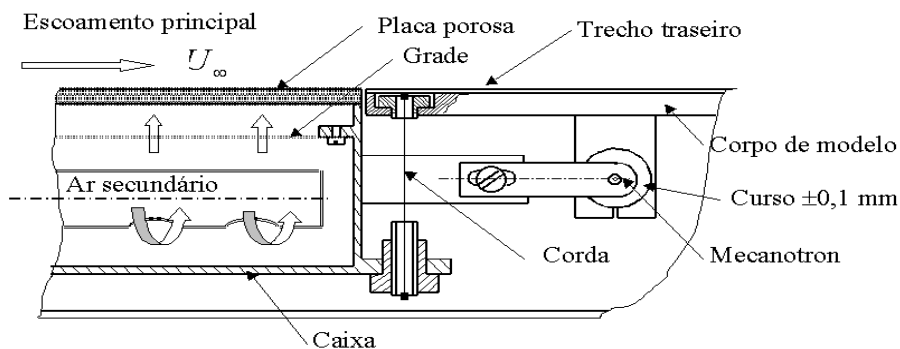


Figura 1. Esquema de suspensão da caixa com a placa porosa.

Na construção do modelo foi prevista a possibilidade de fixação rígida e flutuante da caixa. A fixação rígida foi usada quando foram realizadas medições termoanemométricas de perfis de velocidade na camada limite.

A fixação flutuante foi usada para medição direta de resistência aerodinâmica da placa porosa. Neste caso a caixa foi pendurada em 4 cordas de violão. A construção de mecanismo da suspensão permitiu controlar a posição da caixa em relação a outras partes do modelo, nivelando saliências e rebaixamentos entre a superfície da placa porosa e superfícies dos trechos dianteiro e traseiro. A alimentação do ar secundário para insuflação foi feita através de uma mangueira que foi instalada em um invólucro em forma de perfil aerodinâmico. Este invólucro fez parte do modelo e serviu para evitar a influência do arrasto da mangueira sobre as medições da resistência aerodinâmica da placa. Ao escoamento do ar principal foi exposta só a superfície porosa da caixa. A construção do modelo impediu deslocamento lateral da caixa, pois ela tinha só um grau de liberdade em sentido do eixo x ao longo do modelo.

Sob ação de força de atrito superficial a caixa deslocou-se para a direita (segundo o esquema na Figura (1)). O deslocamento da caixa foi registrado por um elemento sensível, no caso é um mecanotron. O mecanotron é uma lâmpada eletrônica com um cátodo imóvel e dois ânodos móveis, eles têm uma ligação mecânica com uma haste que sai fora da lâmpada. A haste foi mecanicamente ligada com a caixa. O curso máximo de extremidade da haste era de $\pm 0,1$ mm. Conforme (Krasnov N.F. 1980) para evitar o surgimento de gradiente de pressão nas fendas entre os lados dianteiro e traseiro da caixa e os trechos impenetráveis do modelo, as espessuras das fendas não devem ser maior que 0,08 mm. Por isso a espessura da fenda dianteira, no estado de repouso, sem escoamento do ar no túnel, foi reduzida ao valor mínimo de 0,03 mm. É óbvio que durante o ensaio a espessura desta fenda aumentou, devido ao arrasto e a espessura da fenda traseira diminuiu. Para controlar e depois tomar em consideração a variação de pressão, provocada por deslocamento da caixa com a placa porosa, dentro do modelo, perto dos lados dianteiro e traseiro da caixa, foram montados receptores de pressão estática.

O deslocamento da caixa transmite-se para a haste que desloca ânodos em relação ao cátodo, mudando correntes eletrônicas em circuitos do mecanotron. A variação das correntes foi registrada por um micro amperímetro. A variação de correntes foi proporcional à força de atrito (deslocamento da haste). Previamente todo o sistema foi calibrado usando pesos de balança analítica.

O coeficiente de atrito médio pela superfície C_F foi calculado pela fórmula

$$C_F = \frac{X}{q_\infty A} \quad (4)$$

onde: X - força aerodinâmica de atrito;

q_∞ - pressão dinâmica, $q_\infty = \frac{\rho U_\infty^2}{2}$;

A - área de superfície de trabalho da placa porosa.

O ensaio experimental foi realizado em um túnel de vento subsônico, com a câmara de Eiffel, de Universidade Federal de Moscou. Parâmetros do fluxo do ar no túnel foram seguintes: a velocidade do ar $U_\infty = 10$ m/s ($\pm 0,5\%$); a taxa de turbulência da corrente do ar na parte de trabalho variou de 0,5%, na saída do bocal do túnel a 0,7% na entrada do difusor; a temperatura do ar 20 ($-2+10$) °C; gradiente de pressão na parte de trabalho do túnel foi nula $\frac{dp}{dx} = 0$. Mais informação sobre a construção do modelo e do túnel é apresentada em (Vlassov D., COBEM 2001). A velocidade do ar de insuflação V_w foi variada discretamente $V_w = 0,0; 0,05; 0,1; 0,142; 0,18; 0,212; 0,243$ m/s.

Para medir perfis de velocidade na camada limite foi usado um kit de termoanemômetro de temperatura constante DISA de produção dinamarquesa. O sensor do termoanemômetro tinha um

fio de diâmetro de 5 microns e de comprimento de ~1,2 mm, feito de tungstênio e coberto por uma camada fina de platina para evitar a corrosão do fio.

Sabe-se que perto da superfície a transferência de calor do fio aumenta. Neste trabalho a influência de parede sobre o sinal do termoaquímetro foi compensada por uma correção do sinal do termoaquímetro (Vlassov D., COBEM 2001).

3.2. Metodologia de decomposição do vetor da velocidade.

Em condições da insuflação, as linhas de corrente na camada limite sofrem variação muito grande. Diretamente na parede existe só a componente vertical da velocidade V_w dirigida pelo eixo y e na fronteira externa da camada limite existe só a componente longitudinal da velocidade U é igual à velocidade de escoamento principal U_∞ . Pois, o vetor de velocidade W muda sua direção de vertical na parede até a horizontal fora de camada limite. Para decompor o vetor da velocidade e determinar os componentes de velocidade V e U foi usada uma metodologia especial (Vlassov D., DISA Information)]. Nesta metodologia, para decompor o vetor da velocidade W em componentes U e V foi aproveitado um fenômeno bem conhecido de variação de troca de calor entre um cilindro (o fio do termoaquímetro) e o ar, em função de posição do cilindro em relação ao vetor de velocidade W . O sensor do termoaquímetro foi calibrado em túnel aerodinâmico. O sinal do termoaquímetro variou em função de variação de velocidade W e de ângulo φ entre W e o eixo do fio. Com base da calibração foi construído um gráfico de leituras de termoaquímetro E [V] em função de W e φ , pois $E = f(W, \varphi)$.

No ensaio, para determinar os componentes de velocidade, o sensor foi colocado na camada limite em duas posições. A primeira posição foi a perpendicular ao eixo longitudinal da placa (ao longo de coordenada lateral z), nesta posição foi registrado o sinal de termoaquímetro E_\perp [V]. Usando este sinal foi do gráfico determinado o módulo do vetor de velocidade W . Depois de tirar a leitura do E_\perp o corpo do sensor foi girado em torno do seu eixo y para o ângulo de 90° mantendo o mesmo valor de coordenada y . Nesta segunda posição o fio do sensor ficou paralelo ao eixo x . Nesta posição foi registrado o valor do sinal E_\parallel [V] que depois foi usado para determinar do gráfico da calibração o ângulo φ . É óbvio que $U = W \cos \varphi$ e $V = W \sin \varphi$. Mudando a coordenada y e repetindo as mesmas medições foram determinados perfis dos componentes das velocidades $U = f(y)$ e $V = f(y)$.

4. RESULTADOS DE ENSAIO E CONCLUSÕES

4.1 Perfis da velocidade longitudinal perto da parede

Na Figura (2) são apresentados perfis da velocidade longitudinal perto da parede porosa. Perfis foram medidos variando a velocidade de insuflação na seção $x=700$ mm (x é medido a partir de início da placa porosa). A insuflação bruscamente diminuiu o gradiente da velocidade na parede e como seqüência o atrito superficial.

É importante notar que na sub-camada viscosa continua existir a distribuição linear de velocidade com o valor constante de gradiente de velocidade. O conhecimento do valor do gradiente de velocidade na sub-camada viscosa permite diretamente calcular a tensão superficial e o coeficiente de atrito. Se considerar como espessura de sub-camada viscosa δ_v como uma espessura da zona em que existe a distribuição linear da velocidade longitudinal, podemos concluir que essa espessura sofre grande aumento com o aumento da velocidade de insuflação. Sem a insuflação a espessura da sub-camada viscosa apresentou valores em ordem de 0,1 mm. Sob grandes valores da insuflação a espessura da sub-camada laminar atingiu alguns milímetros que permitiu pesquisa-la com maior segurança de medições.

Os perfis da velocidade perto da parede, construídos em coordenadas $U^+ = f(y^+)$ apresentaram que para todas seções e velocidades de insuflação desse ensaio, a equação (1) é válida até aos valores $U^+ = y^+ \cong 5 - 8$.

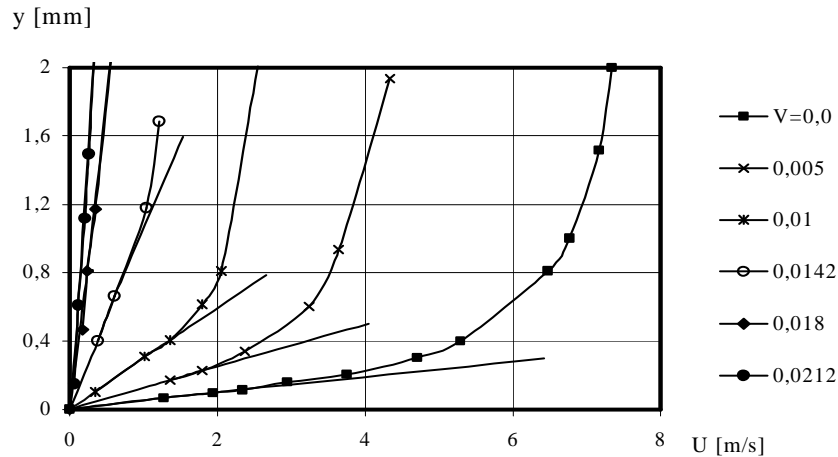


Figura (2). Perfis de velocidade longitudinal perto da parede, $x=700\text{mm}$

Na Figura (3) é apresentada variação de coeficiente local do atrito calculado pela Equação (2) ao longo da placa porosa para várias velocidades da insuflação.

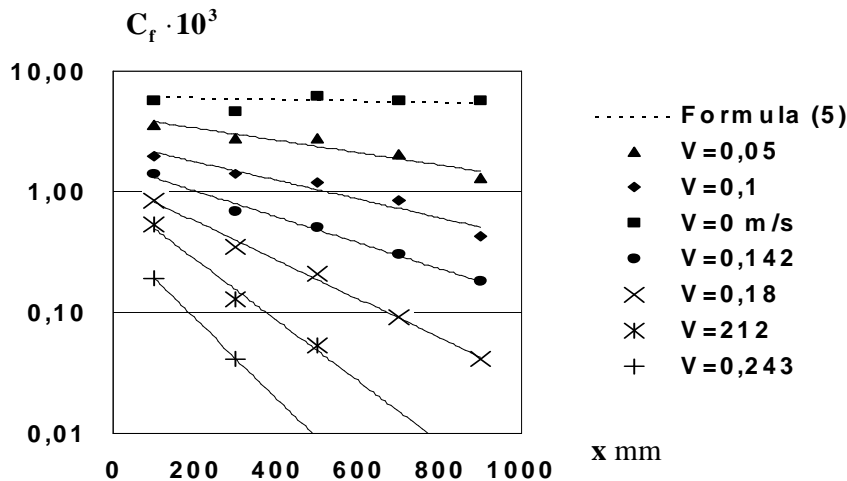


Figura (3). Coeficiente de atrito local ao longo da placa porosa variando a velocidade de insuflação

No mesmo gráfico é colocada a curva de Shults-Grunov para placa impermeável

$$C_{f0} = 0,37(\lg \text{Re}_L)^{-2,584} \quad (5)$$

Nota: o índice “0” é atribuído para condições sem insuflação. O número de Reynolds é calculado com base de comprimento L de início do modelo, ($L=1000+x$).

A insuflação bruscamente diminui o atrito superficial, porem o efeito de diminuição de coeficiente de atrito tem caracter integral, pois ele é acumulado ao longo da placa porosa. Para o

mesmo valor da velocidade de insuflação o atrito no final da placa ($x=900$ mm) diminui de ~ 10 vezes que no início da mesma ($x=100$ mm).

Investigações preliminares revelaram que a porosidade de superfície influi sobre o desenvolvimento da camada limite, mesmo em condições sem a insuflação. A porosidade do material da placa não determina o tamanho médio dos poros. O mesmo valor de porosidade podem ter placas feitas de arames grossas e finas. Uma placa porosa que fosse feita de arames grossas teria a superfície rugosa e grande tamanho dos poros. O desenvolvimento de camada limite sobre esta placa sem a insuflação é diferente que o desenvolvimento sobre a placa compacta. No caso da placa compacta um vórtice como uma bola reflete-se de parede e desestabiliza mais o núcleo turbulento da camada limite

No caso da placa porosa e grandes tamanhos dos poros um vórtice parcialmente penetra em canais dos poros e parcialmente amortece-se que provoca uma demora de desenvolvimento da turbulência. Para minimizar esse fenômeno da porosidade de superfície da placa sobre desenvolvimento da camada limite, a camada superficial da placa porosa, foi feita de grades finas e o tamanho médio de poros foi só $\sim 15 \mu\text{m}$. Os perfis de velocidade e características de turbulência da camada limite sem a insuflação têm boa coincidência com medições análogos feitas na placa impermeável (Klefanoff NACA).

Na Figura (4) são apresentados perfis de velocidade longitudinal em escala semi-logarítmica em

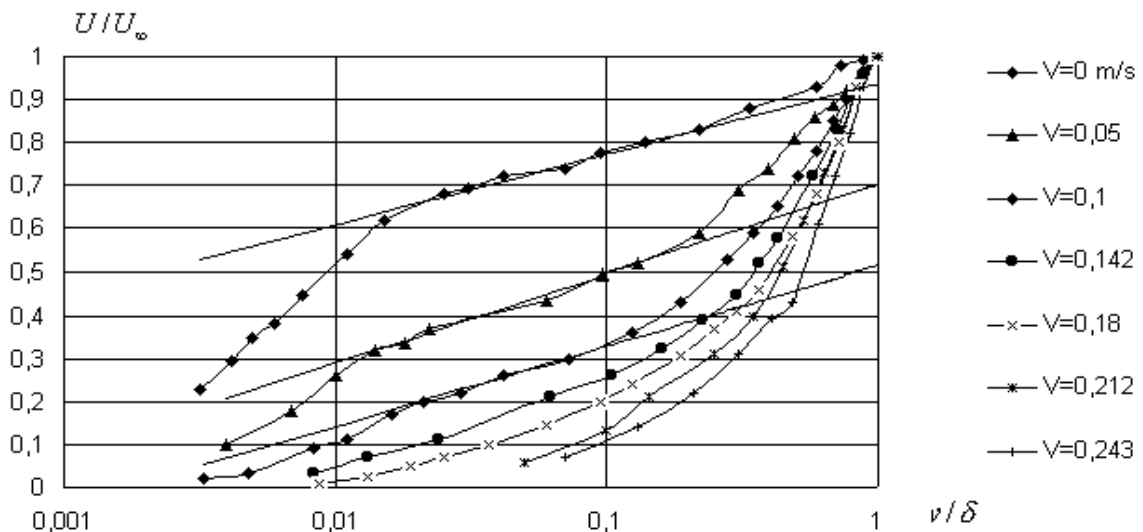


Figura (4). Perfis de velocidade longitudinal em escala semi-logarítmica em seção $x=700$ mm

seção $x=700$ mm. Deve-se prestar a atenção que o perfil da velocidade sem insuflação tem um trecho linear (leia logarítmico) bem claro. Tratamento desse trecho com a Equação (3) deu o coeficiente de atrito superficial de boa coincidência com a Equação (5) e com o coeficiente de atrito calculado pela Equação (2). A insuflação faz com que o trecho logarítmico torna-se gradualmente mais curto, mantendo a sua inclinação quase constante.

Esse feito pode ser explicado por razões seguintes. A equação (3) foi deduzida supondo que em uma zona da camada limite existe a igualdade das tensões viscosas e turbulentas $\tau_t = \tau_w$. Mas a insuflação provoca perto da parede a diminuição das tensões viscosas. Sob grandes valores da insuflação o perfil adquire a forma em “S”, pois perto da parede e na zona externa da camada limite o gradiente da velocidade $\frac{dU}{dy}$ é quase nulo. Com aumento da insuflação a zona de gradientes máximos da velocidade desloca-se da parede para a zona interna da camada limite.

De outro lado, as medições das tensões turbulentas $\tau_t = -\rho \overline{u'v'}$ e comparação delas com as tensões viscosas $\tau_v = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)$ revelou que, em condições de insuflação, as turbulentas ligeiramente aumentam com aumento de velocidade de insuflação e tornam-se cada vez maior que as viscosas, devido a diminuição brusca das últimas. No caso da insuflação com a velocidade $V_w = 0,18$ m/s a

razão $\frac{\mu \frac{dU}{dy}}{\rho u'v'_{\max}}$ já tornam-se menor que 1% e a partir de $V_w > 0,212$ varia só em torno de 0,5%. É

óbvio que na parede e fora de camada limite essa razão é igual a zero. Pois em regimes de grande insuflação desaparece a igualdade $\tau_t = \tau_v$, desaparece, também, o trecho logarítmico no perfil da velocidade e já torna-se impossível determinar o coeficiente de atrito superficial.

4.2 Resultados de medição direta de arrasto

Para aumentar a força de arrasto as medições foram realizadas com a velocidade de escoamento no túnel de vento de $U_\infty \sim 20$ m/s. Resultados de medições são apresentados na Figura (5).

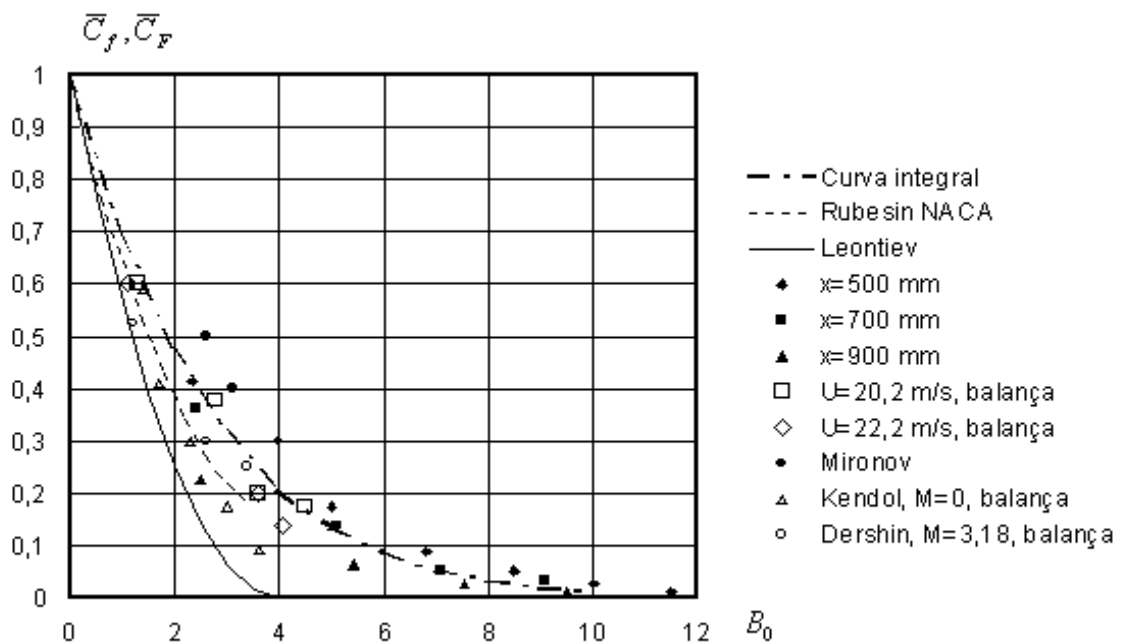


Figura (5). Variação de coeficiente de atrito em função de parâmetro de insuflação.

Os resultados são apresentados em função de um parâmetro de insuflação B_0 que é calculado

$$B_0 = \frac{2\bar{V}_w}{C_{f0}}, \text{ ou } B_0 = \frac{2\bar{V}_w}{C_{F0}} \quad (6)$$

onde: C_{f0} - coeficiente de atrito local na placa impermeável;

C_{F0} - coeficiente de atrito médio pela placa porosa impermeável;

$$\bar{C}_{f0} = \frac{C_f}{C_{f0}} \quad \text{- coeficiente de atrito local relativo;}$$

$$\bar{C}_{F0} = \frac{C_F}{C_{F0}} \quad \text{- coeficiente de atrito médio relativo.}$$

Para os mesmos valores dos parâmetros de insuflação, em seções $x=500, 700, 900$ mm observa-se estratificação das curvas de redução de coeficiente de atrito. Isto mais uma vez indica que o efeito da insuflação tem caráter integral sobre o atrito. Na Figura (5) está apresentada, também, uma curva integral construída com base de dados da Figura (4). Podemos observar que o efeito da insuflação tem um caráter assintótico.

A curva integral está em boa coincidência com os resultados das medições diretas feitas com a balança usando as velocidades do escoamento principal $U_\infty=20,2$ e $22,2$ m/s que. . No mesmo gráfico são traçadas curvas teóricas do Leontiev A.I e do Rubesin. Da primeira teoria segue que para a placa porosa de comprimento infinito, em condições de presente experiência, existe um parâmetro de insuflação crítico $B_0=B_{0crit}=4$ em que o coeficiente de atrito superficial já é igual a zero. Mo nosso caso o comprimento da placa é de ~ 1 m e por isso os pontos de medição passam por cima da curva e apresentam caráter assintótico da diminuição do atrito.

5. REFERÊNCIAS

- Klebanoff P.S., Characteristics of Turbulence in a Boundary Layer with Zero Pressure Gradient, NACA, Report 1247.
- Krasnov N.F., 1980, Aerodinâmica aplicada, Ed. Escola Superior, Moscou, Rússia.
- Kutateladze S.S., Leontiev A.I., 1990 "Heat Transfer, Mass Transfer, and Friction in Turbulent Boundary Layers", Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Leontiev A.I. (sob a redação), 1997, Dinâmica de gases, Ed. Universidade Técnica Federal de Moscou, Rússia.
- Vlassov D.I., Poliaev V.M., 1975, "Using Hot-wire Probes for Investigation of Flow in the Boundary Layer Along a Permeable Surface". DISA Information, Measurement and Analysis, N18, Denmark.
- Vlassov D., 2001, Estrutura de Sub-Camada Viscosa em Camada Limite Turbulenta na Placa Porosa permeável, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, Brasil.

6. DIREITOS AUTORAIS

O autor é único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SURFACE FRICTION ON POROUS PERMEABLE FLAT PLATE

Vlassov D.,

Department of Mechanical Engineering of the Federal University of Paraná; DEMEC Center Polytechnic post office box 19011, Curitiba - PR - Brazil, ZIP CODE 81531-990; vlassov@demec.ufpr.br

***Abstract.** This work presents results from experiments in turbulent boundary layer on a permeable isothermal flat plate with uniform surface mass transfer. The experiments were conducted in a subsonic wind tunnel. The secondary air was injected through the porous wall in the turbulent boundary layer. The porous plate was made with a base of thin stainless steel grids by the method of hot extrusion in a vacuum medium. From longitudinal velocity profiles measured in the viscous sub-layer, surface tension and friction factors were determined along the plate according to the*

variation of the insufflating air velocity profiles, were confirmed by direct measurements of the porous plate drag. The experimental results demonstrate that the transversal injection of air in the turbulent boundary layer reduces considerably the surface friction.

Keywords: *boundary layer, air insuflation, porous material, thermoanemometry, surface friction.*