

Simulação Experimental de Camada Limite Atmosférica Costeira em Túnel de Vento

Gustavo Rabello dos Anjos¹, Norberto Mangiavacchi², Mila R. Avelino³

¹B.Sc. em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Francisco Xavier, 524, 5º. Andar, sala 5023, Bloco A, Rio de Janeiro – Brasil, gustavo.rabello@terra.com.br

²Ph.D. em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Francisco Xavier, 524, 5º. Andar, sala 5023, Bloco A, Rio de Janeiro – Brasil, norberto@uerj.br

³D.Sc. em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Francisco Xavier, 524, 5º. Andar, sala 5023, Bloco A, Rio de Janeiro – Brasil, mila@uerj.br

Resumo: Um estudo de laboratório sobre camada limite turbulenta na qual se desenvolve sobre superfície que apresenta uma mudança abrupta na rugosidade é feito. Os casos de uma superfície uniformemente lisa, de uma superfície uniformemente rugosa e da superfície que troca de lisa a rugosa e de rugosa a lisa são investigadas. Perfis de velocidade média, de intensidade da turbulência, do coeficiente de atrito, do deslocamento local na origem e da espessura da camada interna estão presentes. O coeficiente de atrito foi calculado baseado no método gráfico de Perry e Joubert(1963) e no balanço integral da quantidade de movimento. O mesmo método gráfico foi usado para a validação do deslocamento na origem. A espessura da camada interna foi calculada por dois métodos, o método da “quina” e o método da “convergência”. O documento compara os dados experimentais obtidos no presente trabalho com dados de camada limite atmosférica de Bradley(1968), desta forma, qualquer possível analogia entre os dois trabalhos pode ser obtida.

Abstract : A laboratory study of the turbulent boundary layer which develops over surface that present an abrupt change in roughness is made. The cases of a uniformly smooth surface, of a uniformly rough surface and of the surface that change from smooth to rough and from rough to smooth are investigated. Profiles of mean velocity, of turbulence intensity, of skin-friction coefficient, of the displacement in origin and of the thickness of the internal layer are presented. The skin-friction coefficient was calculated based on the chart method of Perry and Joubert(1963) and on a balance of the integral momentum equation. The same chart method was used for the evaluation of the displacement in origin. The thickness of the internal layer was calculated by two methods, the ‘knee’ point method and the ‘merge’ point method. The paper compares the present data with the lower atmosphere data of Bradley(1968) so that any possible analogy between the two works can be assessed.

Palavras-Chave: camada limite, túnel de vento, simulação experimental.

1. Introdução

A superfície da Terra não é plana e a maioria das regiões planas é inconvenientemente heterogênea. Isto reforça a ocorrência de experimentos anteriores em locais remotos tais como Kansas e Minnesota, onde condições alusivas podem ser realizadas. A compreensão destes efeitos no escoamento das superfícies que apresentam uma mudança brusca na rugosidade superficial se dá principalmente com base em experiências de campo. Um problema na maioria dos estudos realizados é a ausência de medições precisas do escoamento neste tipo de superfície. Um dos poucos estudos atmosféricos que superaram esta dificuldade foi o estudo realizado por Bradley(1968), que mediu os perfis de variação de tensão viscosa superficial em um escoamento neutro. Para estudos de advecção local, o túnel de vento fornece uma alternativa interessante por possibilitar um grau de controle aceitável que pode ser exercido sobre a maioria de fatores relevantes no escoamento; contribuições importantes neste assunto são encontradas em Perry e Joubert(1963), Perry et al.(1969), Antonia e Luxton(1971,1972) Antonia e Wood(1975) Schofield(1975) e Mulhearn(1978). Muitos problemas relevantes e interessantes envolvem fluxos de pequena escala, incluindo o desenvolvimento de soluções

analíticas, conforme estudado em Elliott(1958) e Taylor(1968). Aplicações de mesoescala, e para CLA, especificamente em regiões costeiras foram analisadas em Venkatran(1986) e Shao et al.(1991). Um trabalho de revisão em escoamento turbulento de camada limite sujeita a perturbações súbitas é apresentada em Smits e Wood(1985).

O presente trabalho é relacionado com a modelagem em túnel de vento dos efeitos que uma mudança abrupta na rugosidade na superfície provoca na região interna da camada limite atmosférica. Um dos principais objetivos deste artigo é fornecer ao leitor um retrato detalhado dos escoamentos que se desenvolvem sobre superfícies lisas e encontram uma mudança brusca da rugosidade da superfície. Esta situação é encontrada nas regiões costeiras, onde o escoamento se desenvolve sobre o oceano, e encontra subitamente uma superfície rugosa. O estudo conduzido aqui será simulado em túnel de vento, e comparado com dados obtidos em um aeroporto. Quatro configurações de superfície rugosa são investigadas: uma configuração uniformemente lisa, de lisa a rugosa, de rugosa a lisa e uniformemente rugosa. Desta forma os dados experimentais podem ser analisados diretamente possibilitando o melhor entendimento da estrutura do escoamento turbulento sujeito a variações bruscas de rugosidade superficial. O

trabalho apresenta medidas de perfis de velocidade média na direção longitudinal. Finalmente, considerações sobre os dados experimentais permitiram uma estimativa da tensão viscosa, do deslocamento na origem e da espessura da camada limite interna.

Em trabalhos anteriores, outros autores, Jackson(1976) e Walmsley(1989), compararam dados atmosféricos disponíveis na literatura com dados obtidos em túnel de vento. Na presente investigação, os resultados são comparados com os dados obtidos por Bradley(1968) para a camada limite atmosférica, de modo que qualquer analogia possível possa ser obtida entre as propriedades dinâmicas da camada limite atual do laboratório e um escoamento geofísico real. Aqui vamos mostrar que a velocidade e a tensão viscosa têm o mesmo comportamento qualitativo. O trabalho é um primeiro exercício em um projeto de pesquisa detalhado onde outros tipos de escoamento atmosférico de interesse serão realizados. O aparato experimental é confeccionado de forma a simular futuramente mudanças de temperatura na superfície concomitantemente às mudanças de rugosidade.

2. Aparato experimental

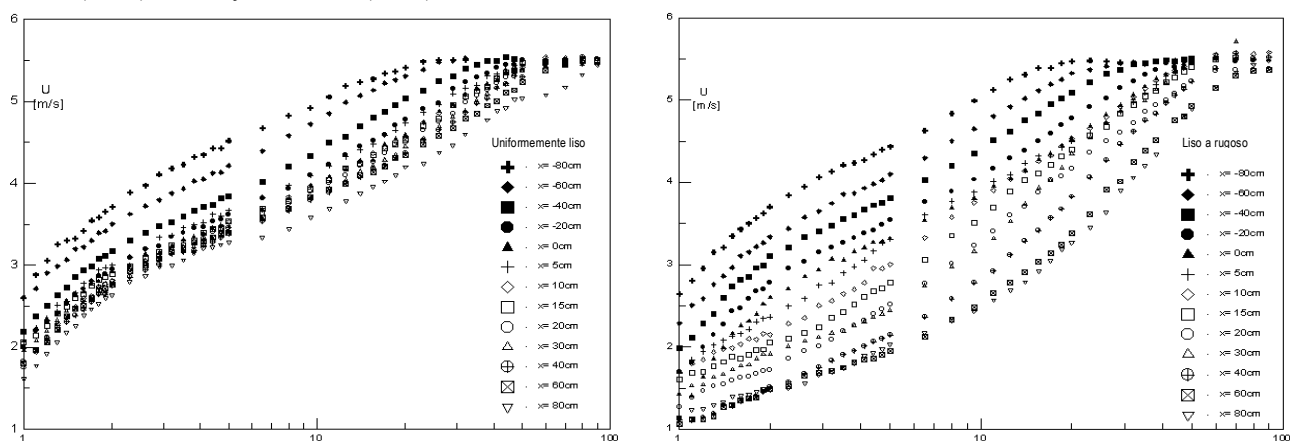
Uma descrição detalhada do aparato experimental pode ser encontrada em Avelino(2001). Aqui, serão apresentadas apenas as características básicas do túnel de vento e da instrumentação. O túnel de vento de circuito de túnel aberto apresenta secção de testes de dimensões 30cm x 30cm x 2m; a secção de testes tem uma parede superior com inclinação ajustável para permitir o desenvolvimento de escoamento com gradiente de pressão nulo. A superfície rugosa é composta por cavidades transversais retangulares de dimensões 3mm x 12mm e passo 24mm. Na configuração com tipos de superfície mistos o primeiro (ou último) elemento rugoso consistia sempre de uma cavidade abaixo da superfície lisa, onde o topo do elemento rugoso estava alinhado com a superfície lisa. Os elementos rugosos utilizados neste trabalho caracterizam uma rugosidade do tipo k onde $w=3k$. Esta geometria é diferente daquelas adotadas em Perry e Joubert(1963), Perry et ali(1969), Antonia e

Luxton(1971, 1972) e Bandyopadhyay(1987). Foram realizadas medições com velocidade de escoamento potencial equivalente a 5,5 m/s. Perfis de velocidade média foram obtidos utilizando um sistema de anemometria de fio quente DANTEC. O sensor de camada limite era do tipo 55P15. Os dados de velocidade média apresentaram erro de 0,6% com base em análise de incerteza de medição.

3. Resultados

3.1. Perfis de velocidade média

Os perfis de velocidades médias estão mostrados nas Figuras 1 a 5 em coordenadas dimensionais e em uma forma semi-logarítmica. A Figura 1 estabelece um padrão para qual todos distúrbios provocados pela presença de uma superfície rugosa precisa ser comparado. Conforme esperado, pode-se observar que tanto o coeficiente angular quanto o linear das retas que representam a região turbulenta decrescem a medida em que o escoamento se desenvolve. Na Figura 2, as regiões lineares desaparecem depois da mudança de rugosidade ($x=0$). No caso rugoso para liso, Figura 3, uma desaceleração no escoamento pode ser observada pela queda no nível das curvas de velocidade até $x=0$; nesta estação, a velocidade começa a recuperar para condições de não-perturbada características de escoamentos sobre superfície lisa, e os valores crescentes do coeficiente linear para os valores da curva de referência, Figura 1. O mais interessante aspecto da Figura 3, entretanto, é a grande distorção no perfil de velocidade próximo à variação de condição superficial ($x=0$); este fato não foi observado em Antonia e Luxton(1972). Para este caso de escoamento, o comportamento logarítmico do perfil de velocidade não foi observado. De fato, pode se notar um afastamento considerável da região logarítmica. A Figura 4 apresenta o comportamento do escoamento para o caso uniformemente rugoso. As conclusões acima implicam na possibilidade de se adotar o método gráfico de Clauser para calcular C_f nos escoamentos que se desenvolvem sobre superfície lisa.



Figuras 1, 2 – Perfis de velocidade média em Túnel de vento, casos uniformemente liso e de liso para rugoso.

Para os escoamentos que se desenvolvem sobre superfície rugosa, o procedimento de cálculo de C_f é mais complexo devido à dependência de dois parâmetros: o deslocamento da origem e a função rugosidade, conforme previamente observado em Perry et al.(1969). Se o escoamento encontrar-se no estado de equilíbrio, o método gráfico de Clauser pode ser estendido para calcular C_f (Perry e Joubert, 1963). Infelizmente este método gráfico apresenta elevado grau de incerteza, de forma que pelo menos um outro método alternativo de estimativa de C_f deve que ser utilizado para reduzir a incerteza dos resultados. Esta segunda estimativa foi baseada na aplicação do balanço integral da quantidade de movimento. Os valores de C_f calculados são apresentados na Figura 5, e comparados com os resultados atmosféricos obtidos por Bradley.

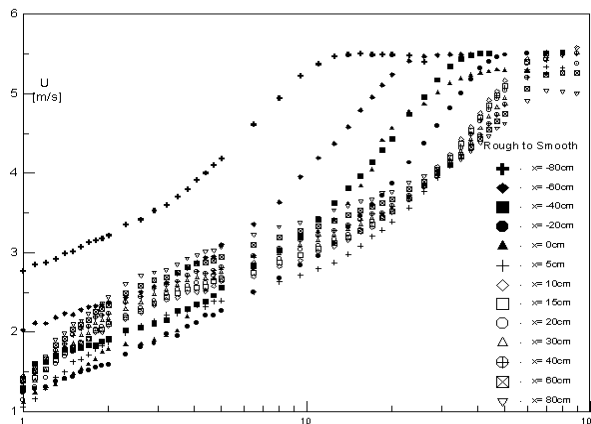


Figura 3 – Perfis de velocidade média, rugoso-liso.

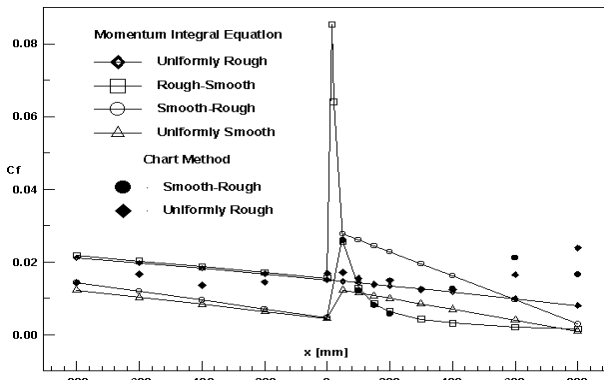


Figura 4 – Perfis de velocidade média

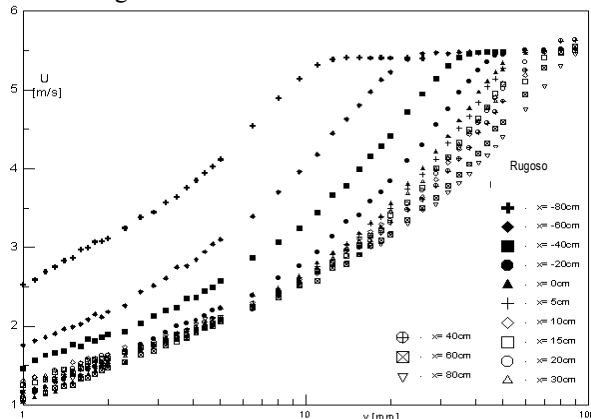
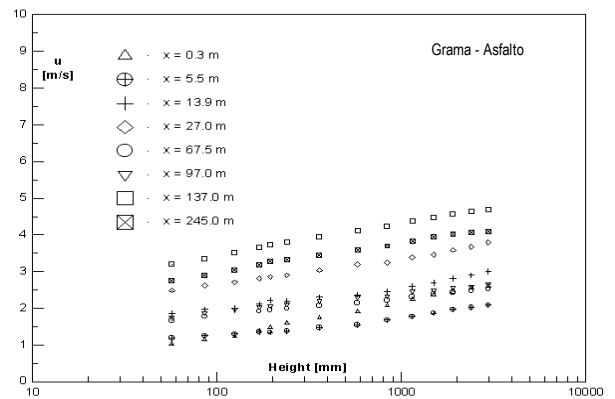
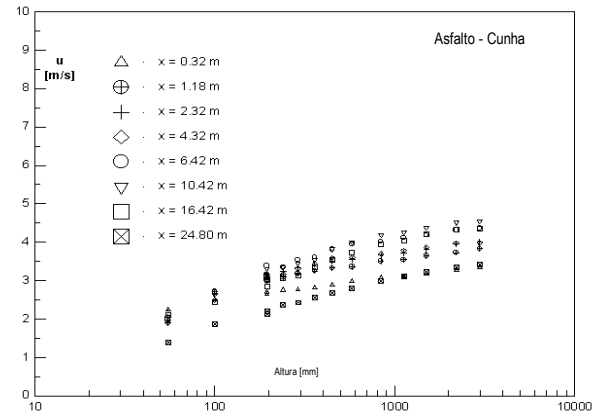


Figura 5 – Variação do coeficiente de atrito



Figuras 6 e 7 – Perfis de velocidade média, Bradley.

As Figuras 6 a 8 mostram os resultados de Bradley para superfícies com variação súbita de rugosidade tanto para os casos em que a variação se dá da superfície uniformemente lisa para a superfície uniformemente rugosa quanto da superfície rugosa para a lisa. Os resultados de Bradley foram obtidos com rugosidades confeccionadas com grama, asfalto e cunhas. As Figuras 6 e 7, são comparadas com o caso similar, simulado em túnel de vento, apresentado na Figura 3, mostrando que as perturbações provocadas pela mudança súbita da superfície lisa para a rugosa apresentam um comportamento similar ao do caso de escoamento atmosférico.

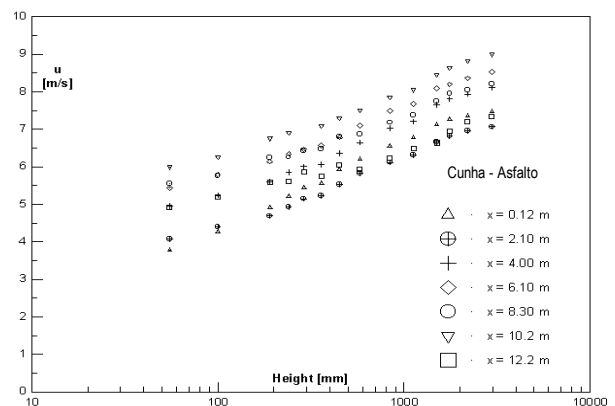


Figura 8 – Perfis de velocidade média; dados de Bradley.

3.2. O Deslocamento na Origem

A determinação do deslocamento na origem, ε , é fundamental para validação do coeficiente de atrito. Todos os métodos gráficos para essa determinação assumem a existência de uma região logarítmica. Este comportamento logarítmico pode não ocorrer próximo a uma mudança brusca da rugosidade. Os valores de ε foram calculados de acordo com o método de Perry e Jourbert(1963). Os valores estimados de ε são mostrados na Figuras 9 e 10, comparados com uma lei de potência. Em oposição aos resultados de Bandyopadhyah(1987), foram encontrados aqui diferentes valores para o expoente na lei de potência. Para o caso de rugosidade uniforme, $m=1,04$ fornece o melhor ajuste dos pontos experimentais, enquanto para o caso de liso a rugoso, foram encontrados $m=0,81$.

3.3. A Camada Superficial

Muitos metodos tem sido propostos na literatura para a determinacao de δ_i . Aqui, serão utilizados dois métodos (Antonia and Luxton, 1971) para a determinação da espessura da camada interna. No primeiro método, δ_i é determinado a partir da posição de convergência de dois perfis de velocidade consecutivos. O resultado dos pontos de convergência dos perfis de intensidade turbulenta fornecem um procedimento fisicamente realista. No segundo método, os perfis de velocidade são apresentados em um gráfico com abscissa $y^{1/2}$. Abaixo dessas coordenadas, duas regiões lineares distintas aparecem com diferentes coeficientes angulares. A interseção das duas linhas estreitas definem o limite da camada interna. Considerando o caráter difusivo do aumento da camada interna e uma expressão logarítmica para o perfil de velocidade média. Panofsky and

Dutton(1984) derivaram uma expressão logarítmica para o crescimento de δ_i . Os valores resultantes de δ_i são mostrados nas Figura 11 e 12 comparados com os resultados de Bradley(1968).

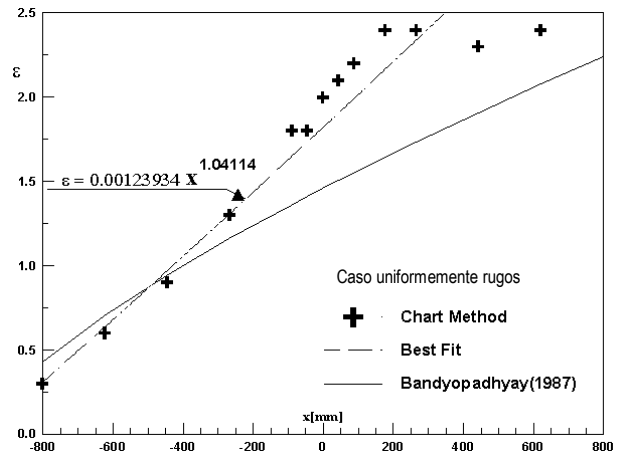


Figura 9 – Deslocamento da origem – ε .

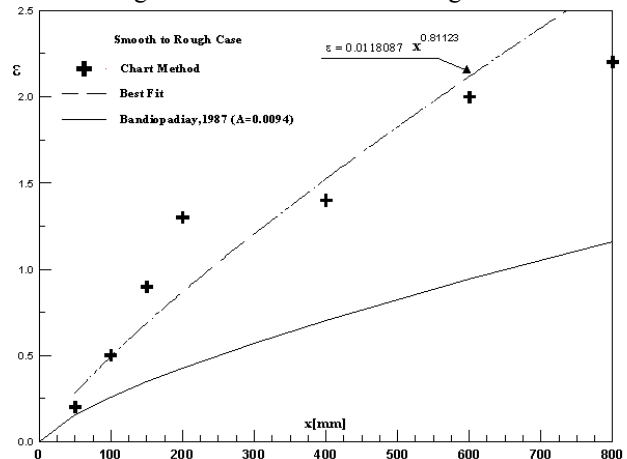


Figura 10 – Deslocamento da origem – ε .

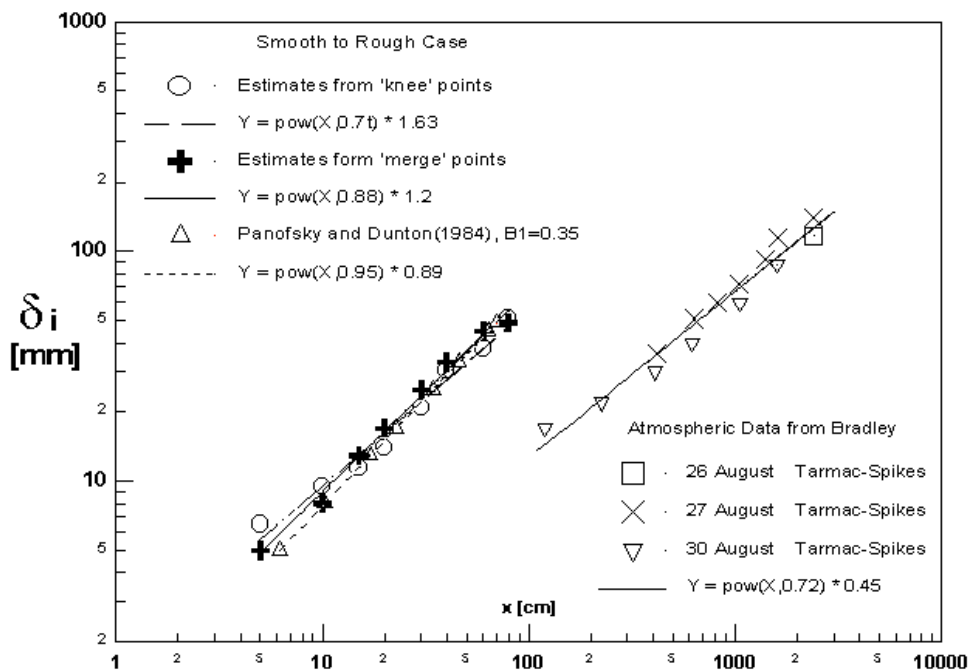


Figura 11 – Comparação entre os comportamentos da camada interna (superficial) – δ_i para o caso liso-rugoso.

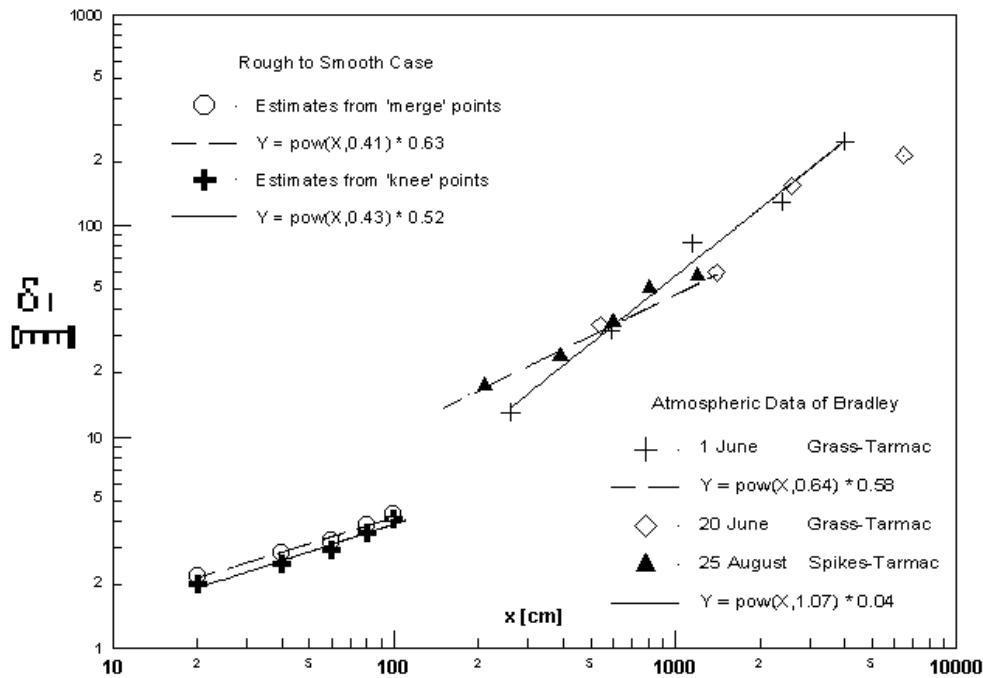


Figura 12 – Comparação entre os comportamentos da camada interna (superficial) – δ_i para o caso rugoso-liso.

A evidência física é que para o caso de rugoso a liso a taxa crescente é muito mais lenta que a do caso liso a rugoso. Para a superfície rugosa a lisa, estimativas do expoente da taxa de crescimento da camada interna encontrados pelos métodos das quinas e da convergência foram $n = 0,41$ e $0,43$ respectivamente. Para o caso de liso a rugoso, foram encontrados $n = 0,77$ e $0,87$. O comportamento qualitativo da taxa de crescimento da camada interna para o fluxo artificial e natural é notavelmente similar. Isto é verdade para os dois casos de mudança de condição superficial: de liso a rugoso e rugoso a liso. Nestes dois casos a rugosidade empregada é uma superfície rugosa do tipo 'k'. O caso de mudança de grama para asfalto apresenta discrepâncias em relação aos resultados obtidos em túnel de vento, visto que a grama é uma superfície do tipo 'd'.

4. Conclusão

Uma comparação dos resultados de túnel de vento apresentados com os resultados de escoamento atmosférico de Bradley (1986) mostra que, de fato, pode ser traçada uma analogia entre o comportamento do escoamento gerado no túnel de vento e o escoamento geofísico real, conforme observado nas Figuras 11 e 12, que apresentam o comportamento da camada limite interna. Sobretudo, o dado presente é consistente com os dados de outros autores, os valores de C_f , de ε e de δ_i encontrados coincidem com aqueles encontrados na literatura, (Perry and Joubert, 1963, Perry et al., 1969 e Antonia and Luxton, 1971, 1972).

5. Referencias

- Avelino, M.R., Int. J. Heat & Mass Transf., vol. 145, pp. 1578—1583, 2001.
- Avelino, M.R., Menut, P.P.M. and Silva Freire A.P., Proc. 7th Braz. Nat. Meet. Ther. Sci., 1998.
- Smits, A.J. and Wood, D.H. Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 17, pp. 321—358, 1985.
- Antonia, R. A. and Luxton, R. E. J. Fluid Mechanics, vol. 48, pp. 721—761, 1971.
- Antonia, R. A. and Luxton, R. E. J. Fluid Mechanics, vol. 53, pp. 737—757, 1972.
- Bandyopadhyay, P. R. J. Fluid Mechanics, vol. 180, pp. 231—266, 1987.
- Panofsky, H. A and Dutton, J. A. Atmospheric Turbulence, Wiley-Interscience, N.Y., 1984.
- Perry, A. and Joubert, P.N. J. Fluid Mech., vol 17, pp. 193—211, 1963.
- Perry, A. Schofield, W.H. and Joubert, P.N. J. Fluid Mech., vol 37, pp. 383—413, 1969.
- Schofield, W. H. J. Fluid Mech., vol 70, part 3, pp. 573—593, 1975.
- Elliott, W. P. Trans. Amer. Geophys. Un. 39, pp. 1048—1054, 1958.
- Mulhearn, P. J. Boundary Layer Meteorol. 15, pp. 3—30, 1978.
- Bradley, E. F. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 94, pp. 361—379, 1968.
- Venkatran, A. Boundary Layer Meteorol. 36, pp. 149—156, 1986.
- Walmsley, J. L. Boundary Layer Meteorol. 47, pp. 251—262, 1989.
- Shao, Y., Hacker, J.M. and Schwerdtfeger, P. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 117, pp. 1299—1324, 1991.
- Jackson, N. A. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 102, pp. 924—933, 1976.
- Rao, K. S., Wyngaard, J. C. and Coté, O. R. J. Atmos. Sci. 31, pp. 738—746, 1974.