

5. SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM TÚNEL DE VENTO

Acir Mércio Loredo-Souza

Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 / 305
lac@cpgec.ufrgs.br

Edith Beatriz Camaño Schettini

Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 – 91501-970 – Porto Alegre
bcamano@iph.ufrgs.br

Mario José Paluch

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Passo Fundo
Campus I - BR 285 - km 171 - Bairro São José
Caixa Postal 611/631 - CEP 99001-970 - Passo Fundo - RS
corrient@upf.tche.br

Resumo

O presente trabalho trata das técnicas desenvolvidas na simulação de camada limite em túneis de vento. São apresentadas diversas técnicas para obter o perfil de velocidades médias do vento, a intensidade de turbulência, a escala integral e o espectro de potência, correspondentes ao tipo de terreno que se pretende simular. São apresentadas as características de dois túneis de vento: o da Universidad Nacional del Nordeste, em Resistência, Argentina, *Prof. Jacek Piotr Gorecki*, de circuito aberto, e o da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, *Prof. Joaquim Blessmann*, de circuito fechado.

Palavras Chave: camada limite atmosférica, túnel de vento, turbulência.

1. Camada limite atmosférica

1.1. Conceitos fundamentais

A camada limite atmosférica (CLA) é a região da troposfera diretamente afetada pela presença da superfície da Terra e responde a forçantes superficiais com escalas de tempo em torno de uma hora ou menos. Os forçantes incluem arrasto, evaporação e evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificações do escoamento induzidas pela topografia. A espessura da CLA corresponde à chamada altura gradiente (z_g). Para ventos fortes, um valor típico de z_g é 2500 m, dependendo da rugosidade do terreno e do *fetch*, que é a distância a barlavento que o vento tem para “correr” sobre o terreno.

Para qualquer velocidade do vento, o número de Reynolds associado com a CLA é tão grande, que se espera que o escoamento seja turbulento. Para ventos fortes, com velocidades médias horárias superiores a 10 m/s, o escoamento é suficientemente turbulento para que a mistura produzida suprima os efeitos térmicos e a CLA possa ser tratada como sendo adiabática e

neutralmente estável. Estas hipóteses podem ser aplicadas à maioria dos escoamentos de interesse de simulação em túnel de vento, como o estudo de cargas sobre estruturas e alguns casos de dispersão de poluentes.

A transferência de quantidade de movimento na CLA é dada, fundamentalmente, pelas tensões aparentes de Reynolds ou tensões turbulentas, $-\rho_{ar} \overline{u'w'}$. O comportamento desta tensão define duas camadas dentro da CLA: a camada superficial e a camada de Ekman. A camada superficial é aquela região da CLA próxima da superfície, onde os fluxos e tensões variam menos que 10% de seu valor médio. Dentro desta camada, pode-se identificar uma fina subcamada, chamada subcamada interfacial ou microcamada, onde o transporte molecular domina frente ao transporte turbulento. A espessura desta subcamada é chamada de “deslocamento do plano-zero” e notada por z_d (Fig. 1). Para os casos de cidades, onde a rugosidade está dada pelos edifícios e vegetação, o vento tende a passar por cima dos mesmos e se estabelecem regiões de estagnação (abrigadas) entre eles. O “deslocamento do plano-zero” corresponde à altura média dos edifícios. O escoamento entre os edifícios é local e inteiramente dependente da geometria e não podem ser estabelecidas características gerais. Quando a rugosidade superficial é pequena (como em campo aberto e mar), o valor de z_d não é significativo.

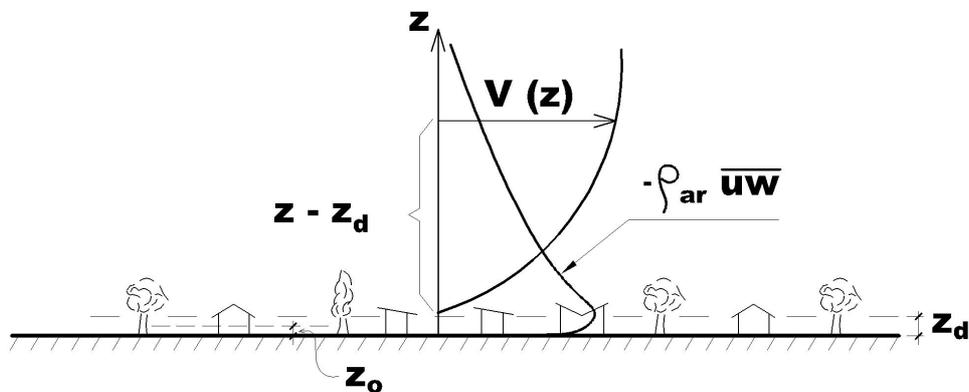


Figura 1. Esquema dos perfis de velocidades médias e tensões de Reynolds da CLA e alturas características.

A camada de Ekman apresenta um decréscimo das tensões de Reynolds com a altitude, até elas praticamente se anularem na região da altura gradiente. Outras forças que atuam nesta camada são as forças de pressão e a força de Coriolis devida à rotação da Terra.

As tensões de Reynolds são máximas, $-\rho_{ar} \overline{u'w'}_{max}$, para a altura do deslocamento do plano-zero, z_d , e a tensão de cisalhamento τ_o é transmitida através da subcamada interfacial. A tensão τ_o pode ser escrita por:

$$\tau_o = \rho_{ar} u_*^2 = \rho_{ar} \overline{u'w'}_{max} . \quad (1)$$

1.2. Efeito da rugosidade superficial

A rugosidade do terreno controla o valor da tensão de cisalhamento, τ_o , e, por conseguinte, a velocidade de corte u_* . Quanto mais rugosa for a superfície, maior será a tensão de cisalhamento junto à superfície e maior será o déficit de quantidade de movimento na CLA. A distância necessária para que um perfil sobre um dado terreno alcance o equilíbrio depende da rugosidade superficial. Se for suave, como no caso de campo aberto, o déficit de quantidade de movimento é menor que para o caso de superfícies mais rugosas, como cidades. Cada um produzirá um perfil de velocidades médias do vento diferente, como será exemplificado mais tarde.

A adaptação do escoamento à mudança de rugosidade não é instantâneo. Quando a superfície passa de uma rugosidade suave para uma mais rugosa, há uma diminuição da velocidade média e são geradas maiores tensões de cisalhamento, próximo do terreno. Esta transferência de quantidade de movimento (negativa para cima) só atingirá o equilíbrio quando o perfil de velocidades médias alcance a altura gradiente, z_g , e o novo perfil esteja completamente estabelecido.

1.3. Perfis de velocidade média mais utilizados em engenharia

Existem basicamente duas formas de perfis de velocidades médias utilizados na área de Engenharia de Vento: o perfil em lei de potência e o perfil logarítmico.

O perfil em lei de potência tem a forma geral:

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (2)$$

Em escala log-log, a Equação (2) representa uma reta de declividade p , que descreve bem a CLA com exceção da região muito próxima da superfície. Em termos práticos, corresponde aproximadamente a valores de $(z - z_d)$ de 10 m para campo aberto e 30 m para cidades, medidos desde o solo. O expoente p é caracterizado pelo tipo de terreno, variando de 0,11, para superfícies mais lisas como mar e lagos, a 0,34, para cidades com grande densidade de prédios altos.

Esta lei, amplamente utilizada, apresenta alguns inconvenientes em sua aplicação. O primeiro é que, como a equação é válida para qualquer valor de $(z - z_d)$ positivo ou nulo, não reconhece o topo da CLA e a velocidade do vento aumenta indefinidamente. O segundo problema é que o modelo não tem uma justificativa teórica, porém representa bem o perfil médio de velocidades. Devido a este bom ajuste, muitas vezes são atribuídas características não-realísticas ao modelo.

O terceiro problema a destacar é que o modelo apresenta um bom ajuste na camada de Ekman, mas na camada próxima à superfície este ajuste é pobre. Esta característica pode ser importante em Engenharia de Vento, nas aplicações a edifícios, torres e linhas de transmissão. Porém, com técnicas adequadas, este problema pode ser facilmente resolvido nos túneis de vento de camada limite.

O perfil de velocidades média do vento dado por uma lei logarítmica apresenta a forma:

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right), \quad (3)$$

onde z_o representa a altura média da rugosidade do terreno ou rugosidade aerodinâmica e κ é a constante de von Kàrmàn, cujo valor adotado é, em geral, de 0,4. Em escala semi-log, esta lei é representada por uma reta de declividade $1/\kappa$ ($= 2,5$), com ordenada à origem z_o (Fig. 2), função do tipo de terreno.

Em contraposição à lei potencial, esta lei apresenta um bom ajuste na camada próxima ao solo, mas o ajuste é pobre na região superior da CLA. Os dois parâmetros da equação, a velocidade de corte, u_* , e a rugosidade aerodinâmica, z_o , dependem das características físicas do terreno e do vento. A velocidade de corte é uma medida da declividade do perfil logarítmico na parede, pois ela depende de τ_o . A rugosidade aerodinâmica, z_o , que caracteriza a rugosidade local do terreno, define a interseção do perfil de velocidades médias com o plano de deslocamento zero. Assim, como exemplos ilustrativos, para o caso de campos abertos, o valor de z_o é da ordem de 0,03 m, e para cidades com edifícios baixos, $z_o = 0,3$ m (Blessmann, 1995).

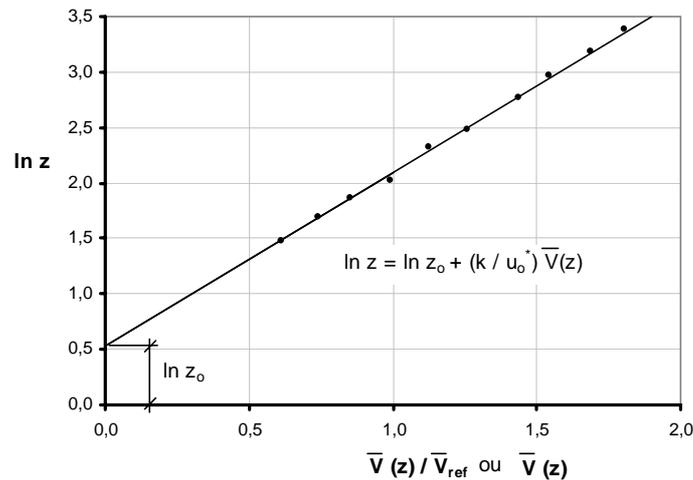


Figura 2. Determinação do comprimento de rugosidade z_0 .

A lei logarítmica apresenta três vantagens com relação à lei potencial. A primeira é que aparece nela um fator de escala, representado por z_0 . A segunda é que é uma lei derivada da teoria. E por último, provê um bom ajuste próximo à superfície. Porém, o problema da transição do perfil de velocidades entre duas rugosidades persiste, não podendo ser representado por esta lei. Por último, este perfil não ajusta bem na parte superior da CLA, o que não é um impedimento muito grande, se considera que as aplicações de interesse ocorrem, normalmente, próximas da superfície.

2. Túneis de vento de camada limite

A maioria dos túneis aeronáuticos são muito curtos para desenvolverem boas simulações de camada limite. Alguns destes túneis foram utilizados para desenvolver técnicas artificiais de reprodução das características da camada limite, entretanto apenas o perfil de velocidades médias era geralmente simulado. Em outros túneis, partes previamente não utilizadas do retorno do circuito aerodinâmico foram consideradas adequadas para a simulação da camada limite. Na maioria dos casos, porém, novos túneis de vento foram projetados especificamente para o propósito de simulação da camada limite atmosférica (Cermak, 1977; Davenport, Isyumov, 1967; Cook, 1975; Blessmann, 1982; Hertig, 1984; Stathopoulos, 1984; Hansen, Sorensen, 1985). As Figuras (3) e (4) mostram as duas configurações principais: (a) túnel de retorno fechado, onde o escoamento recircula; e (b) túnel de retorno aberto, onde o escoamento é absorvido em um extremo e descarregado em outro. Cada sistema tem vantagens e desvantagens: o circuito fechado requer menos energia, a área de trabalho é próxima da pressão atmosférica e retém partículas de erosão e outros sinalizadores, porém o escoamento vai aquecendo gradualmente e é mais caro de construir; o circuito aberto é mais barato de construir e mantém a temperatura do escoamento constante, porém a secção de trabalho está normalmente acima ou abaixo da pressão atmosférica, o que requer vedações elaboradas em torno das portas e mesas de trabalho para evitar vazamentos, além do laboratório tornar-se poluído pelos gases traçadores ou fumaça.

3. Histórico da simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento

No início da década de 60, Jensen (1963, 1965) e Frank (1963) mostraram que se pode obter uma escala apropriada da estrutura do vento natural cobrindo-se um comprimento considerável do piso do túnel de vento com um material de rugosidade adequada. Este dispositivo corresponde à principal fonte de turbulência na atmosfera a baixa altitude, em ventos em condições de estabilidade neutra. Por esta época, Cermak (1975, 1977) havia construído um túnel meteorológico na Colorado State University, Estados Unidos, capaz de simular camadas limites termicamente estratificadas.

Baseado nos estudos de Jensen e Frank, Davenport (1967), em 1965, construiu um túnel de vento de camada limite na University of Western Ontario, Canadá. Estes túneis de vento de camada limite longos, nos quais as camadas limites podiam crescer naturalmente sobre o piso da secção de ensaios coberto com elementos de rugosidade em escala com o tipo de terreno, foi uma das duas vias da resposta inicial aos estudos de Jensen, conforme indica a Figura (5) (Cook, 1990).

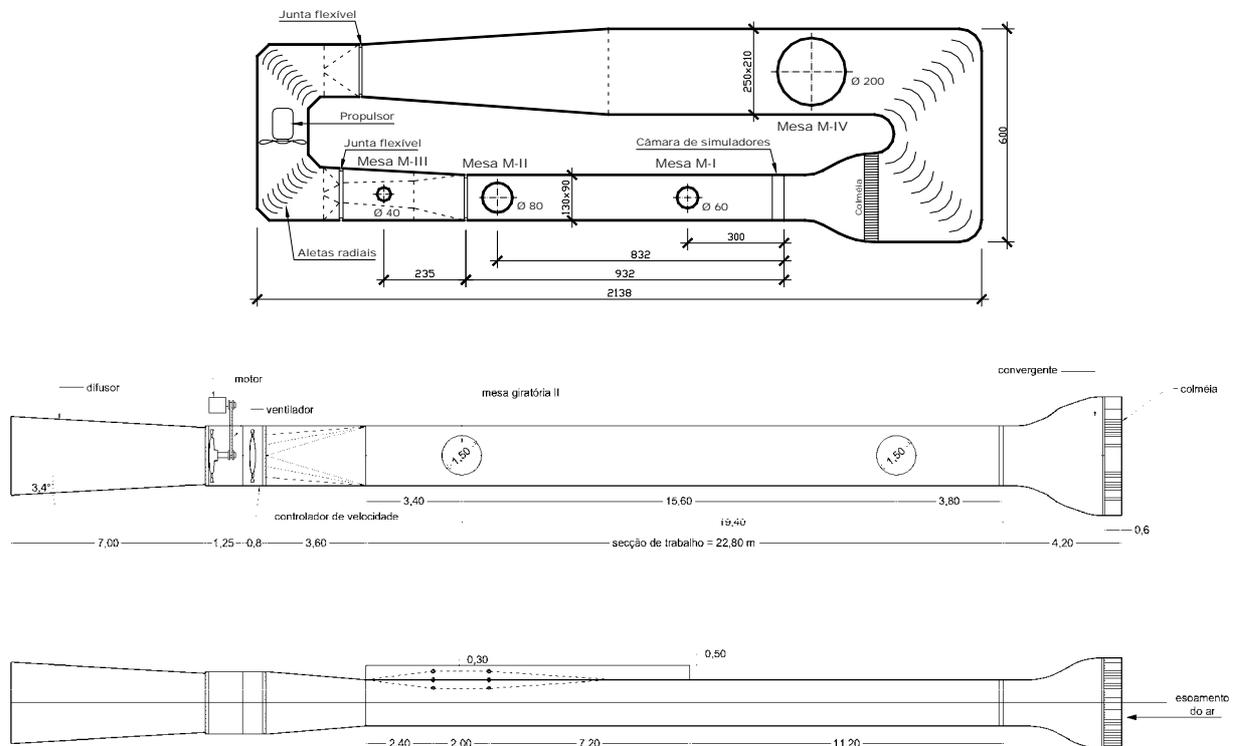


Figura 3. Exemplo de dois túneis de vento de camada limite típicos: (acima) túnel de retorno fechado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil (Blessmann, 1982), e (abaixo) túnel de retorno aberto da Universidad Nacional del Nordeste, Resistência, Argentina (Wittwer, Möller, 2000).



Figura 4. Fotografias dos túneis de vento Prof. Joaquim Blessmann/UFRGS (esquerda) e Prof. Jacek Piotr Gorecki/UNNE (direita).

Entretanto, o crescimento natural da camada limite é relativamente lento, dependendo da rugosidade do terreno (Fig. 6). Mesmo nestes túneis longos, os maiores fatores de escala obtidos naturalmente eram em torno de 1:500, sendo então necessário que algum dispositivo artificial fosse utilizado para aumentar a espessura da camada limite e atingir escalas maiores (Cook, 1990).

Porém, vários laboratórios de pesquisa não dispunham de recursos para construir túneis longos e tentativas foram realizadas para reproduzir algumas das características da camada limite atmosférica com métodos completamente artificiais. Já se sabia que escoamentos deslizantes podiam ser gerados por barras transversais com diferentes espaçamentos (Owen, Zienkiewicz, 1957) ou por uma tela curva (Elder, 1957), tendo estas técnicas sido utilizadas para reproduzir o perfil de velocidades médias do vento empregando o modelo da lei de potência. Estes métodos artificiais, descritos por Lawson (1968), representavam somente os perfis de velocidade média. Como estes métodos eram incapazes de reproduzir as características da turbulência, os perfis de velocidade média se degeneravam rapidamente, particularmente quando perturbados pela presença de um modelo reduzido de alguma edificação. Em modelos reduzidos isolados os principais efeitos do perfil de velocidades médias são reproduzidos adequadamente, porém os efeitos médios em grupos de modelos são fracamente reproduzidos e os efeitos transientes das rajadas não são representados de forma alguma. Conseqüentemente, estes métodos não são mais considerados adequados para aplicações idôneas no projeto de edificações à ação do vento. A Figura (5) indica seu uso terminando em torno de 1970, embora eles ainda sejam empregados para fins demonstrativos e didáticos.

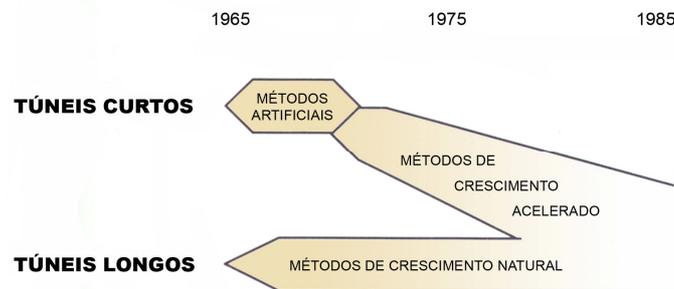


Figura 5. Evolução dos métodos de simulação da camada limite em túnel de vento (Cook, 1990).

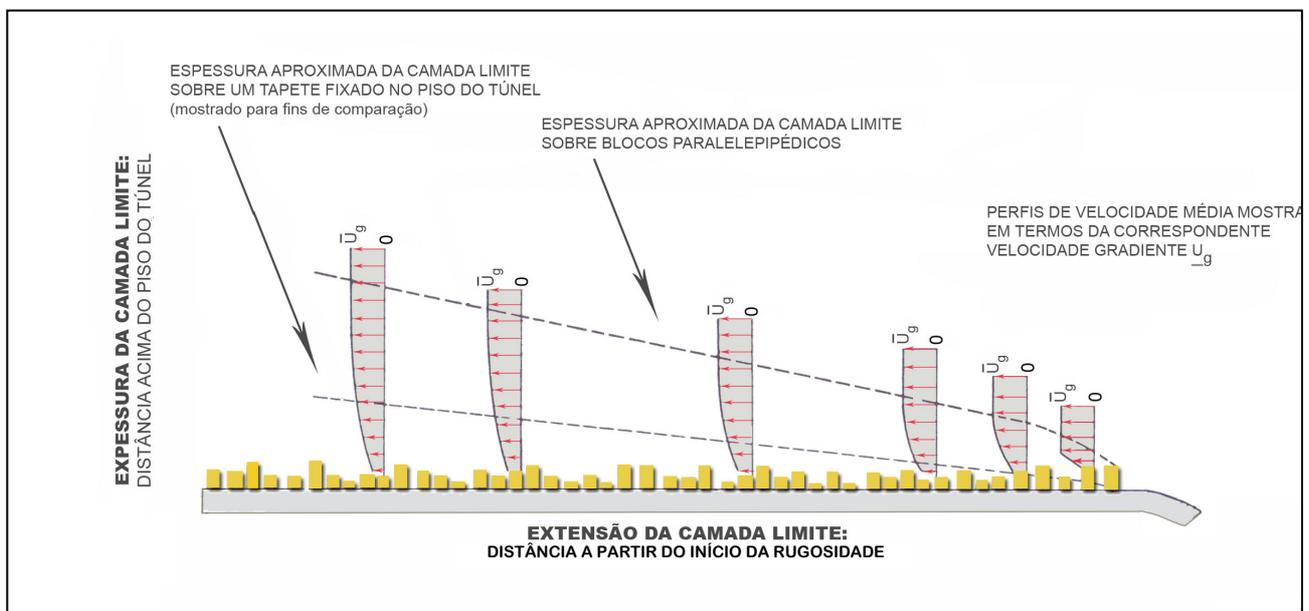


Figura 6. Crescimento natural da simulação de uma camada limite atmosférica em túnel de vento (Davenport, Isyumov, 1967).

O uso de métodos artificiais decaiu quando foram desenvolvidos métodos de acelerar o crescimento natural da camada limite sem alterar significativamente suas características. As secções de trabalho aeronáuticas muito curtas (comprimento:altura - 1:1) não eram adequadas para estes

métodos, sendo frequentemente empregados nas secções mais longas ($> 4:1$). Os primeiros métodos foram polarizados em dois procedimentos distintos. Um dos procedimentos teve o intuito de representar toda a altura da camada limite atmosférica, tendo sido utilizado para estudos de edifícios altos e problemas de dispersão sobre longas distâncias em escalas em torno de 1:500. Destaca-se entre estes métodos o método desenvolvido ao longo de muitos anos por Armitt e Counihan (1968), por Counihan (1969, 1973) e por Robins (1979). O outro procedimento teve a intenção de representar somente a região próxima da superfície terrestre com os maiores fatores de escala necessários para o estudo de edificações baixas. Isto é exemplificado pelo método desenvolvido por Cook (1973). Estes são apenas dois dentre muitos outros métodos (Blessmann, 1972, 1973; Cermak, 1982; Cook, 1978, 1982; Tieleman et al., 1978).

O desenvolvimento dos métodos de simulação tem aumentado sua precisão. A tendência em empregá-los em túneis longos tem ofuscado a distinção entre métodos completamente naturais e de crescimento acelerado, conforme indicado na Figura (5). A partir dos elementos habitualmente usados em simulações modernas, foram cunhados os nomes genéricos “métodos de rugosidade, barreira e dispositivos de mistura” (Cook, 1990).

Os processos citados acima têm em comum o fato de empregarem corpos sólidos para a reprodução de uma ou mais das características do vento natural. Todos eles, em menor ou maior grau, causam uma diminuição da velocidade média obtida no túnel. Em casos extremos, esta redução pode atingir a cerca de 80%, como no caso de grelhas de malha quadrada de elevado índice de área exposta (Blessmann, 1990). Uma terceira técnica, que parece ter sido iniciada em 1971 (Blessmann, 1972, 1973, 1976; Schon, Mery, 1971), procura reproduzir a estrutura do vento natural por meios puramente aerodinâmicos. Mais precisamente, com jatos de ar lançados perpendicularmente ao vento gerado no túnel, a partir de seu piso.

4. Métodos de simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento

4.1 Métodos passivos

Um arranjo típico dos dispositivos de simulação é mostrado na Figura (7), a qual corresponde a uma simulação em torno de 1:250 pelo método de Cook (1973, 1978, 1982). O papel da rugosidade é o mesmo que em uma camada com crescimento natural; ela representa a rugosidade da superfície terrestre em torno do protótipo. A rugosidade é a componente mais importante pois ela estabelece os três parâmetros da lei logarítmica z_0 , u_* , e z_d . A barreira e os dispositivos de mistura são a parte “artificial” da simulação. A barreira fornece um déficit de quantidade de movimento ao nível do piso e também altura à camada limite, a qual é misturada com a simulação sendo desenvolvida pelo dispositivo de mistura. No caso ideal, o escoamento na área de testes a sotavento da rugosidade deveria ter as características de uma camada limite desenvolvida sobre um comprimento de rugosidade muito maior e sem qualquer outra característica adicional imposta pela barreira ou dispositivo de mistura.

As barreiras e os dispositivos de mistura variam de forma entre os diferentes métodos e normalmente existe interação entre eles. O dispositivo de mistura mostrado na Figura (7) é uma grelha plana a qual gera turbulência uniforme, sendo que neste caso somente a região de superfície é representada na simulação (Cook, 1973). O método de simulação de altura total usa os elementos elípticos de Counihan (1969), mostrados na Figura (8), para gerar turbulência que aumenta sua intensidade à medida que a simulação é mais próxima do solo. A barreira pode ser a placa plana mostrada na Figura (7) (Cook, 1973), mas a mistura é melhorada por perfurações (Fig. 9), degraus no topo da placa (Counihan, 1969) ou placas triangulares, tipo dente de serra (Cook, 1978). Standen (1972) idealizou um arranjo de elementos trapezoidais que combina as funções de barreira e dispositivo de mistura (Fig. 10). Ao invés de uma barreira sólida, alguns métodos formam uma barreira a partir de jatos de ar soprando a barlavento (Schon, Mery, 1971; Nagib et al., 1976) ou transversais ao escoamento (Blessmann, 1977), onde os jatos formam uma parede de fluido, sendo estes procedimentos discutidos em 4.2. Em geral, camadas limite mais espessas e, portanto, maiores

fatores de escala, são obtidos a partir de uma extensão da área coberta pelos elementos de rugosidade ou de um aumento da altura da barreira. A altura máxima que a barreira pode atingir sem impor suas próprias características ao escoamento depende do tamanho e extensão dos elementos de rugosidade, de tal forma que maiores fatores de escala podem ser obtidos para as simulações “urbanas” (com maior rugosidade) do que para simulações “de campo aberto” (menor rugosidade).

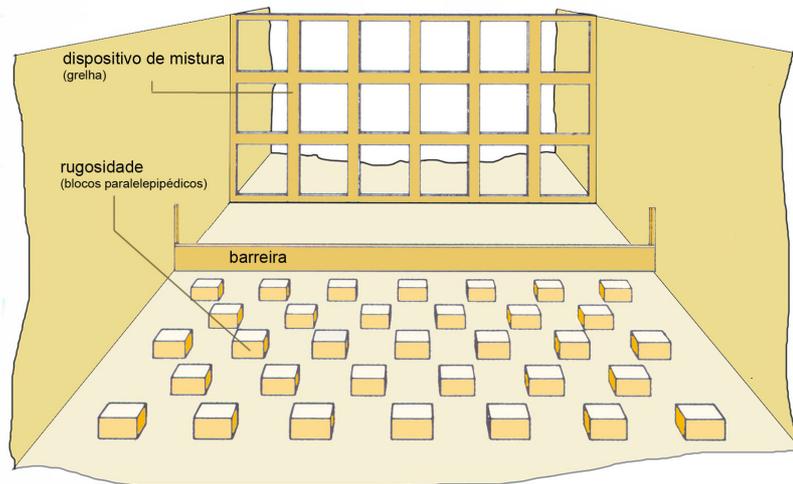


Figura 7. Arranjo típico dos dispositivos de simulação em túnel de vento.

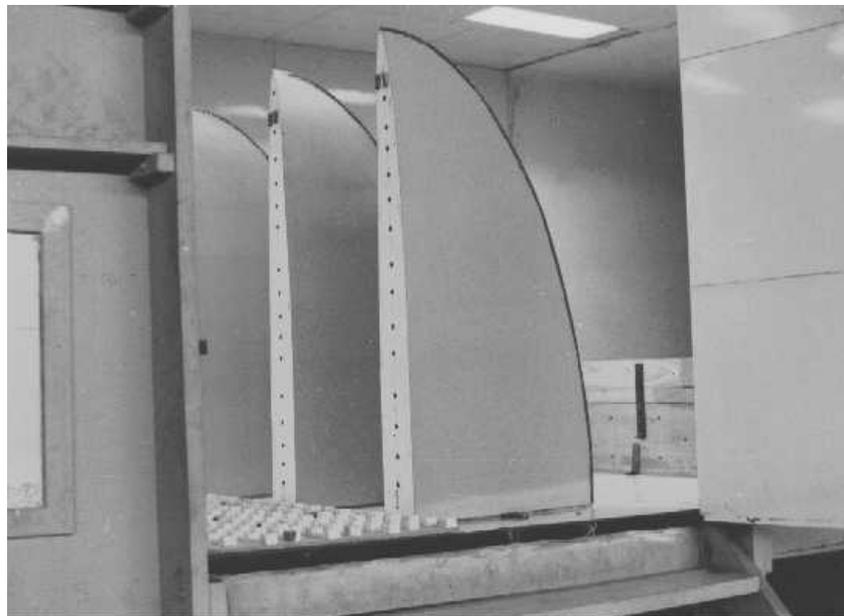


Figura 8. Simuladores de Couinhan utilizados no Túnel Prof. Jacek P. Gorecki.



Figura 9. Barreiras perfuradas utilizadas no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

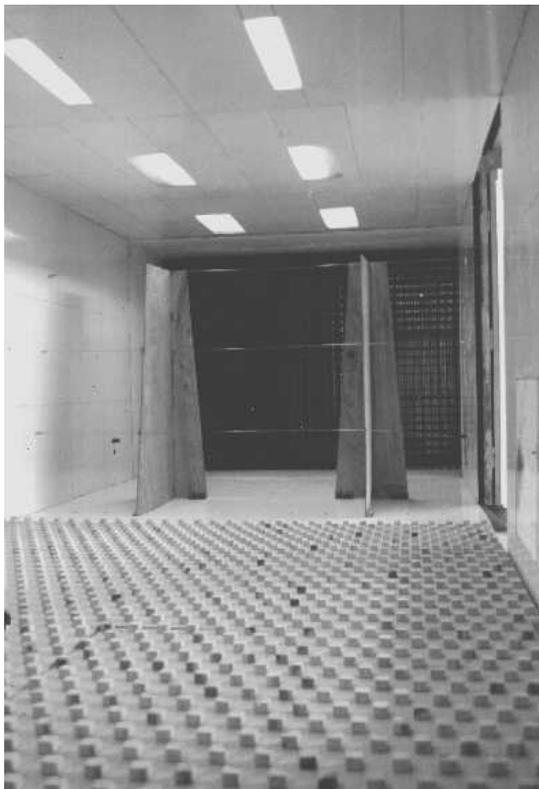


Figura 10. Elementos de rugosidade e simuladores de Standen utilizados no túnel de vento Prof. Jacek P. Gorecki.

Nas Figuras (11) e (12) são apresentados os dispositivos empregados (De Bortoli et al., 2002), no túnel de vento de circuito aberto, da Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, para a obtenção de simulações da camada limite atmosférica de espessura parcial, correspondentes a um terreno suburbano, com $p = 0,25$ (expoente da lei potencial de velocidades médias) e $z_o = 0,7m$, conforme a Norma Argentina de Vento, CIRSOC 102 (1984).

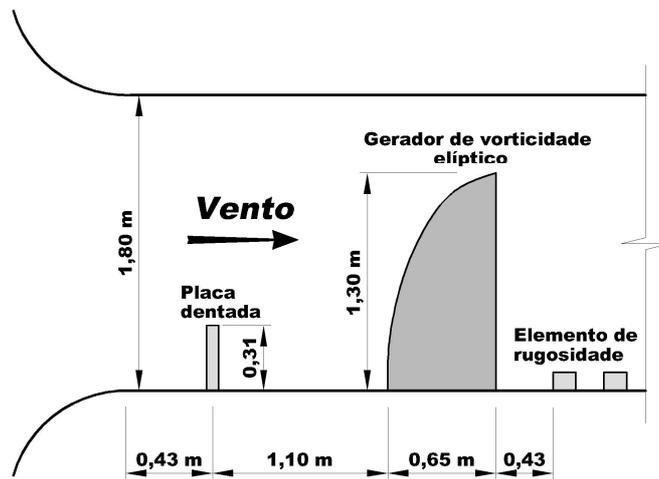


Figura 11. Dispositivos de simulação tipo Counihan modificado.

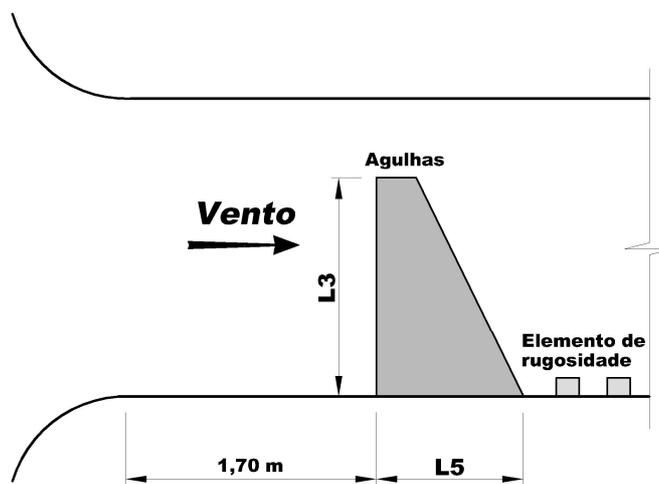
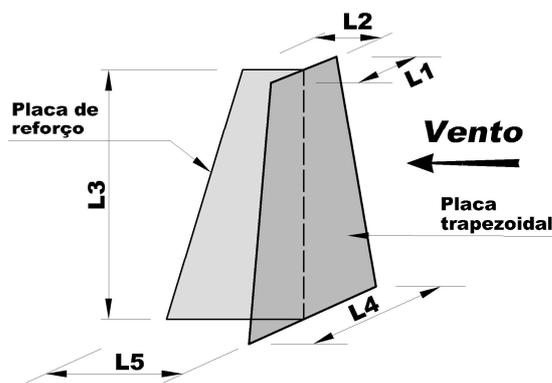


Figura 12. Dispositivos de simulação tipo Standen modificado.

A barreira empregada na denominada simulação BL-I (Fig. 11) possui uma altura de 0,31 m, aproximadamente 50% maior que a recomendada por Counihan (1973) para obter uma simulação de espessura total de 1,3 m de altura. Os geradores de vorticidade elípticos (dispositivos de mistura) possuem uma altura de 1,3 m.

As agulhas (*spires*) empregadas na denominada simulação BL-II (Fig. 12), agulhas tipo A da Fig. (13), respondem à geometria proposta por Irwin (1981), mas com a parte superior truncada. As dimensões das agulhas foram obtidas por tentativa e erro.

A rugosidade superficial, empregada nas simulações BL-I e BL-II, foi calculada pela metodologia proposta por Counihan (1973) para simulações de espessura total. A rugosidade foi materializada com blocos de madeira, de $30 \times 30 \times 22 \text{ mm}^3$ (comprimento \times largura \times altura) dispostos com espaçamento longitudinal e transversal de 80 mm (densidade de ocupação de 15%) ao longo de 17,1 m da câmara de ensaio.



AGULHA A (m)	AGULHA B (m)
L1 = 0.22	L1 = 0.17
L2 = 0.38	L2 = 0.30
L3 = 1.40	L3 = 1.40
L4 = 0.43	L4 = 0.32
L5 = 0.72	L5 = 0.65

Figura 13. Dimensões das agulhas empregadas nas simulações BL-I e BL-II.

Na Figura (14) são apresentados os perfis de velocidade média das simulações BL-I, BL-II, BL-III e BL-IV, onde a velocidade de referência é a correspondente a uma cota de 0,4 m.

Na Figura (15) são apresentadas as intensidades locais da componente longitudinal da turbulência.

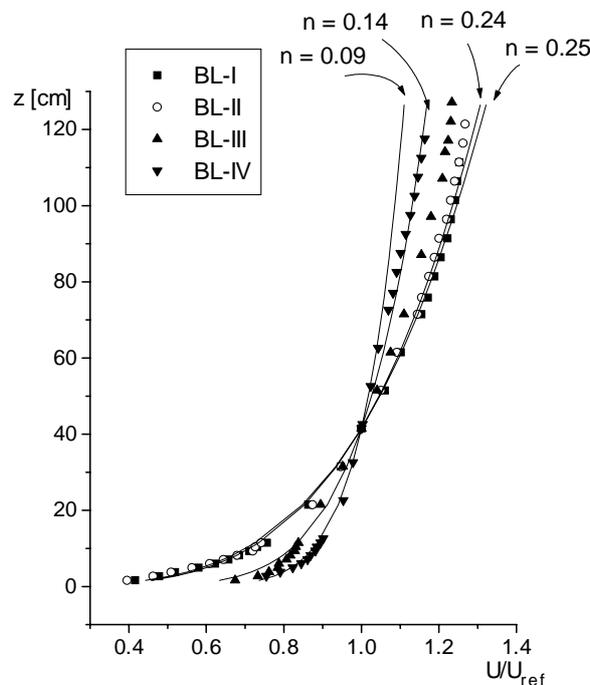


Figura 14. Perfis de velocidades médias para o túnel de vento de circuito aberto "Jacek P. Gorecki".

A simulação BL-III foi obtida substituindo a agulha tipo A pela agulha tipo B (Fig. 13) e retirando a rugosidade nos últimos 5 m, em relação à seção de ensaio. A simulação BL-IV foi obtida substituindo também a agulha tipo A pela agulha tipo B (Fig. 13) e retirando totalmente a rugosidade do piso do túnel. As simulações BL-III e BL-IV foram concebidas com o intuito de obter simulações de espessura parcial com $p < 0,25$.

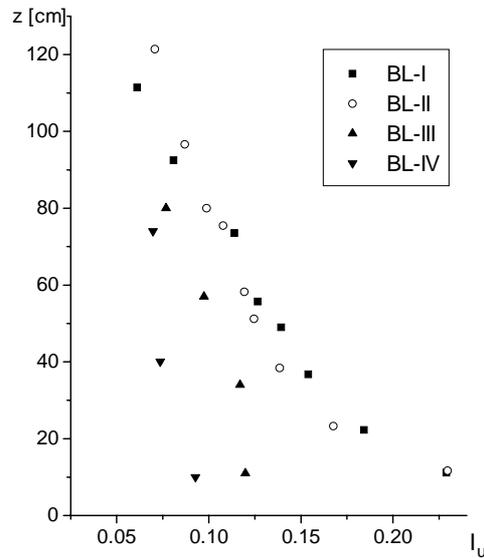


Figura 15. Intensidade local da turbulência para a componente longitudinal da turbulência para o túnel de vento de circuito aberto “Jacek P. Gorecki”.

Nas Figuras (16) e (17) são comparadas as densidades espectrais medidas nas simulações BL-I e BL-2 com o espectro atmosférico sugerido por ESDU (1982), descrito pela seguinte expressão:

$$\Phi(f)f / u'^2 = 4(fL_{x,u} / \bar{U}) [1 + 70.8(fL_{x,u} / \bar{U})^2]^{-5/6}, \quad (4)$$

onde f é a frequência, $\Phi(f)$ é a função densidade espectral, \bar{U} é a velocidade média, e u' é o valor RMS da componente longitudinal da turbulência.

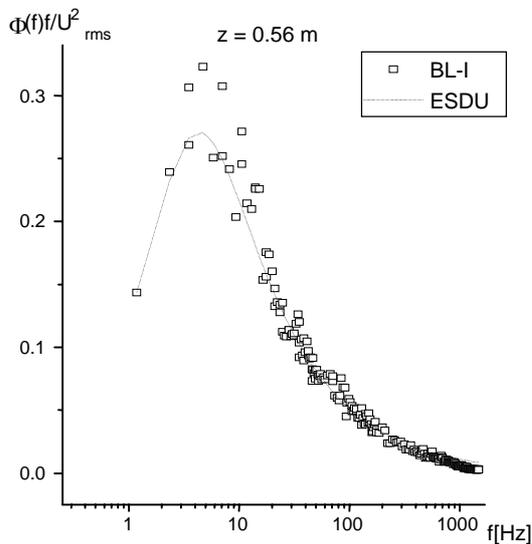


Figura 16. Típico espectro de potência BL-I.

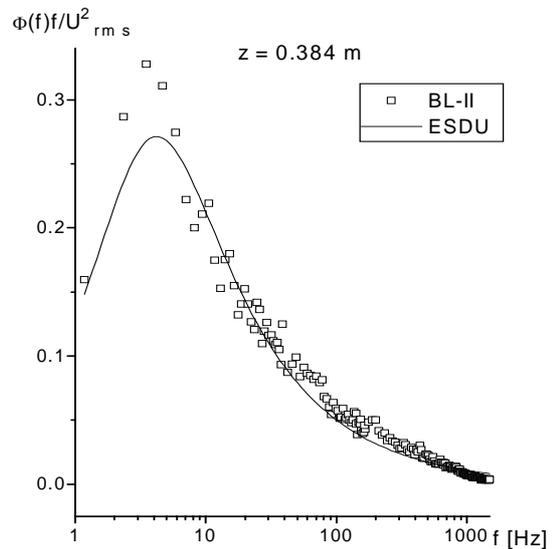


Figura 17. Típico espectro de potência BL-II.

Na Fig. (18) são apresentadas as macroescalas obtidas do ajuste dos espectros medidos, no âmbito inercial e de frequências elevadas, com o sugerido por ESDU (1982). Finalmente, na Fig. (19) são apresentados os fatores de escala da simulação, S , calculados com o procedimento sugerido por Cook (1977) através da seguinte expressão:

$$S = 91,3(z - z_d)^{0,491} / L_{x,u}^{1,403} z_0^{0,088}, \quad (5)$$

onde z é a coordenada vertical, z_d e z_o são o deslocamento do plano zero e o comprimento de rugosidade, respectivamente, da lei da parede ou lei de Prandtl.

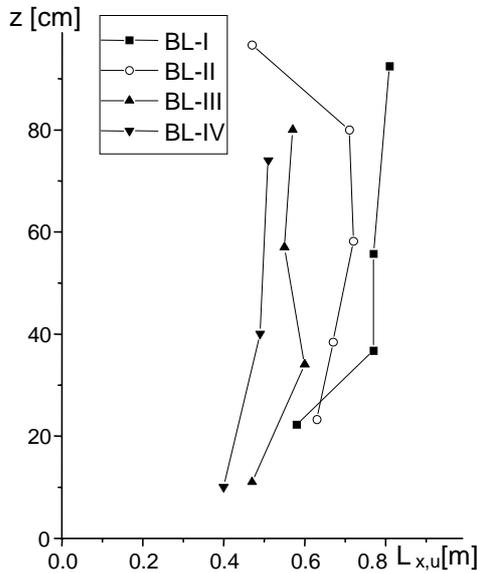


Figura 18. Escalas integrais na direção do escoamento.

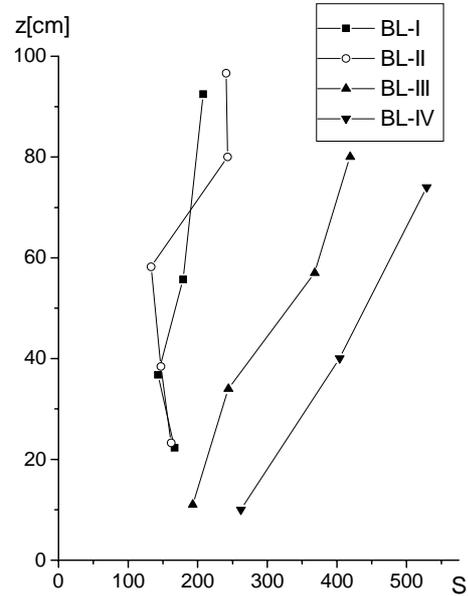


Figura 19. Fatores de escala.

A partir das figuras apresentadas pode-se concluir que as simulações da camada limite atmosférica BL-I e BL-II, correspondentes a um terreno suburbano, com escalas $S \approx 50$, apresentam uma aceitável correspondência com os parâmetros atmosféricos (médios e flutuantes). Entretanto, as simulações BL-III e BL-IV obtidas removendo a rugosidade superficial, em forma parcial ou total (para obter $p < 0,25$), apresentam um acelerado incremento do fator de escala, S , com a altura, reduzindo sua utilidade.

A escala linear da simulação é determinada por comparação com dados em escala natural. Ela é determinada efetivamente pelos dois parâmetros de comprimento que descrevem a velocidade média do vento e as características da turbulência: rugosidade aerodinâmica, z_o , e macro escala da turbulência, L_u . O ajuste pode ser feito por tentativa e erro, porém é mais conveniente se feito pela substituição dos valores medidos transformados em escala natural, z_o / λ_L e L_u / λ_L , na equação

$$L_{x,u} = 25(z - z_d)^{0,35} z_o^{-0,063}, \quad (6)$$

e resolvendo para o fator de escala λ_L . Obtida uma estimativa para o fator de escala a partir da velocidade média e do espectro da componente longitudinal da turbulência, as demais características da turbulência deveriam ser checadas.

Em uma simulação parcial a altura na qual o ajuste deveria ser adequado depende da altura de interesse, mas costuma ocupar no mínimo 75% da altura da secção de ensaios. Quando o túnel é muito curto para atingir-se a escala linear desejada, duas situações são possíveis: (a) a escala linear do modelo reduzido da edificação deve ser reduzida para ajustar-se à escala linear reduzida da simulação; ou (b) a escala linear da simulação deve ser aumentada por meios artificiais, desde que a conseqüente redução na precisão da simulação seja aceitável.

Uma forma de acelerar ainda mais o crescimento da camada limite é distorcer a rugosidade superficial. Tieleman et al. (1978) sugerem a utilização de uma rugosidade inicial bem grande, diminuindo gradualmente até o tamanho correto próximo ao modelo reduzido a ser testado. Cook

1990) confirma a efetividade do método, o qual também permite que uma barreira maior seja usada resultando em simulações adequadas até um fator de escala linear de até 1/100.

Nas simulações no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, usualmente somente a parte mais baixa da camada limite atmosférica é simulada. A maior parte das simulações inclui o uso de elementos de rugosidade, agulhas e placas perfuradas. Em alguns casos, um grupo de jatos transversais também é usado em conjunto com um ou mais dos dispositivos citados (Blessmann, 1982). Até o momento, ventos com perfis de velocidade média com expoente da lei de potência variando de $p = 0,11$ a $p = 0,36$ já foram simulados.

Na Figura (20) são mostrados os dispositivos utilizados na simulação de quatro tipos de escoamento, sendo que na Figura (21) são mostrados os correspondentes perfis de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência, para duas seções de ensaio do túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*. Nesta Figura são apresentados os perfis de velocidade correspondente à lei potencial com expoentes $p = 0,11$, $0,23$ e $0,34$ (Eq. 2), além do perfil gerado por uma grelha, para as mesas I e II (Fig. 3).

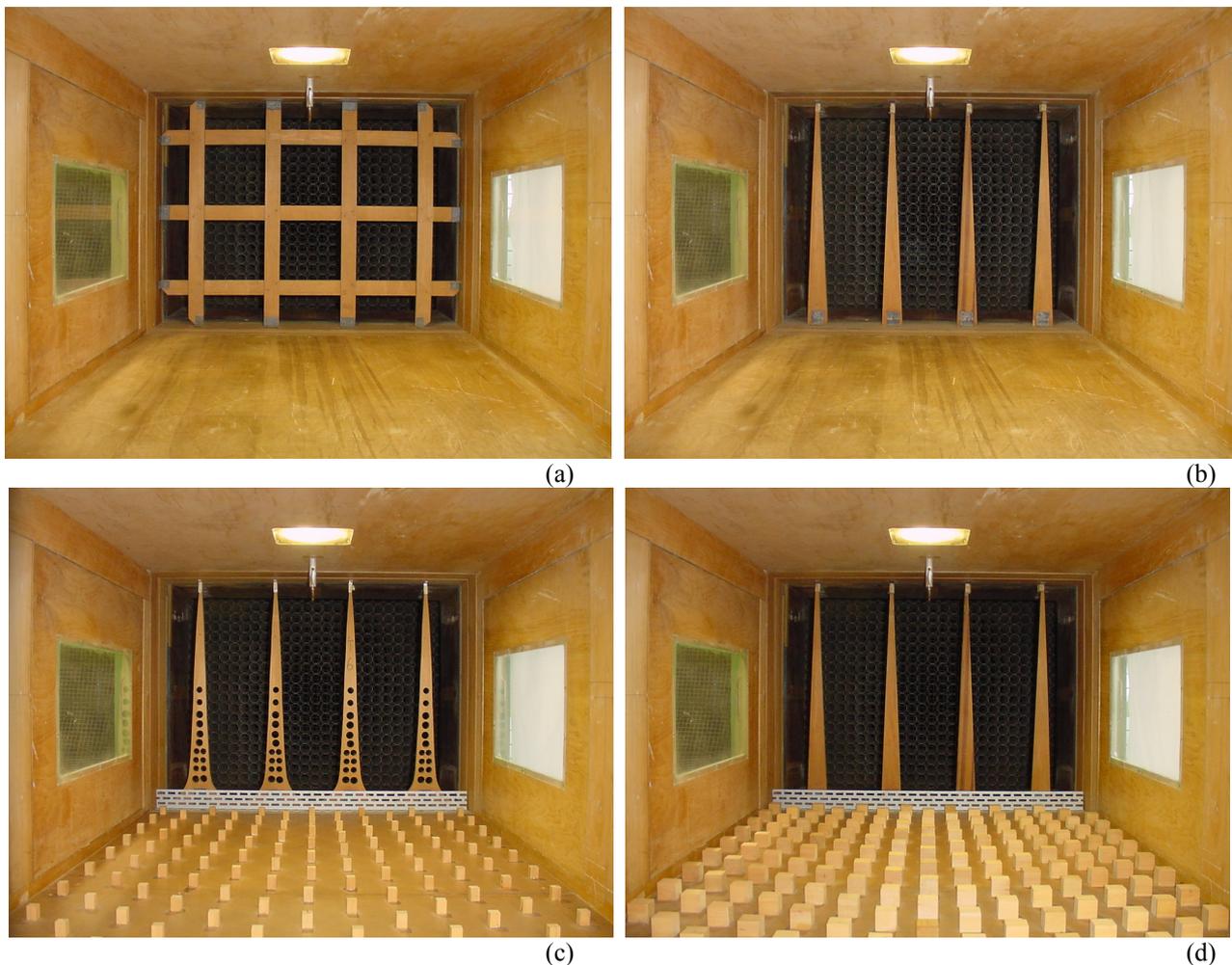


Figura 20. Dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*. (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$.

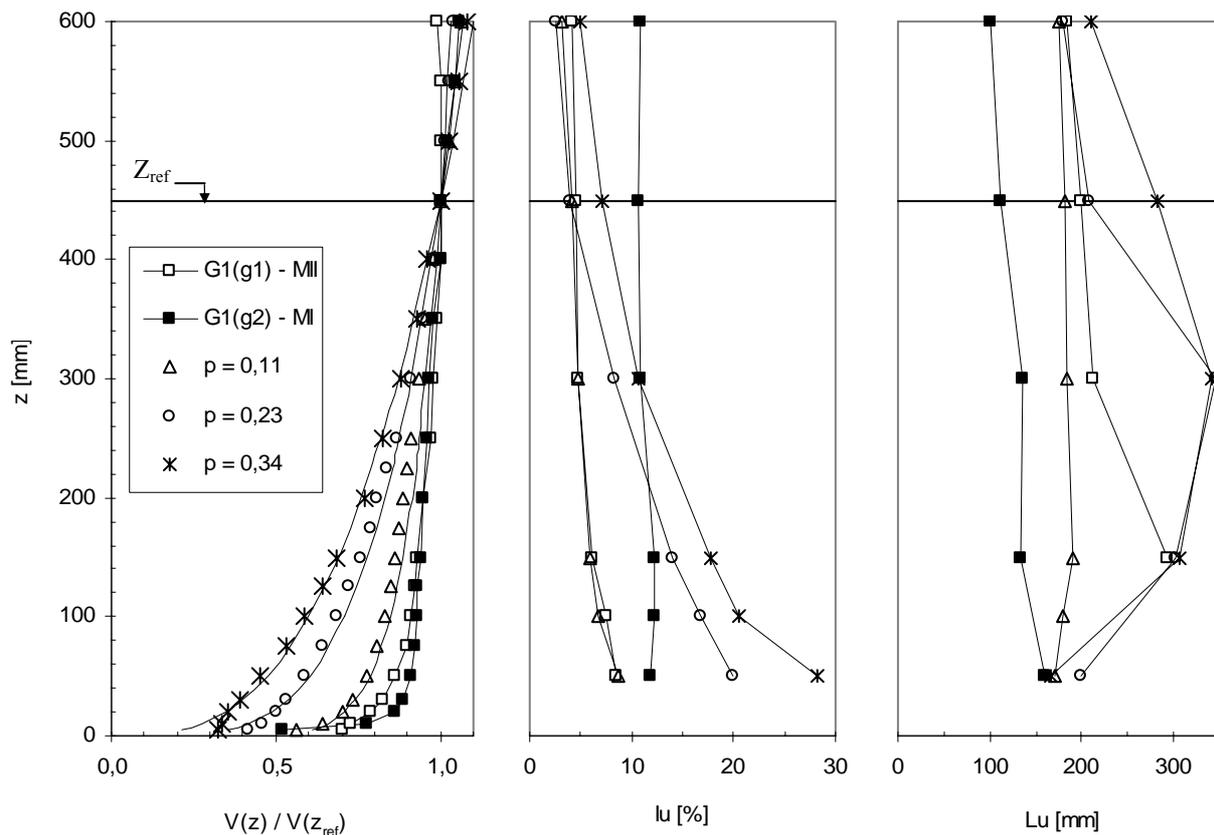


Figura 21. Perfis de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas seções de ensaio do túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

Na norma brasileira NBR-6123 (1988) são apresentados diversos tipos de terreno e suas características principais. A título de exemplo, os terrenos correspondentes ao perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,23$, correspondem a terrenos com rugosidade entre as categorias III e IV da NBR 6123(1988) e têm as seguintes características:

Categoria III – terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.

Exemplos:

- granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
 - fazendas com sebes e/ou muros;
 - subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas;
- A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m.

Categoria IV – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.

Exemplos:

- zonas de parques e bosques com muitas árvores;
 - cidades pequenas e seus arredores;
 - subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
 - áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
- A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m.

4.2 Métodos ativos

Todos os dispositivos mencionados acima têm em comum o fato de utilizarem obstáculos para reproduzir uma ou mais características da camada limite atmosférica. Portanto eles causam um efeito de bloqueio, com uma conseqüente perda de velocidade do escoamento.

O procedimento apresentado por Blessmann (1972) e que parece ter sido iniciado em 1971 (Blessmann, 1972, 1973, 1976; Schon e Mery, 1971), reproduz as características do vento natural através da utilização de uma técnica aerodinâmica: jatos de ar lançados perpendicularmente ao escoamento principal no túnel de vento (Fig. 22). Esta técnica oferece duas vantagens: (a) não há diminuição da velocidade média da corrente de ar, como acontece com obstáculos sólidos; pelo contrário, há um aumento desta velocidade, em virtude da quantidade de movimento adicionada à corrente longitudinal de ar pelos jatos transversais; (b) facilita o controle das características do vento, dentro de certos limites, controle este feito a partir do registro que comanda a vazão de ar nos jatos, podendo ser realizado durante a realização dos ensaios, sem necessidade de parar o funcionamento do túnel para mudança de grelhas, blocos no piso, etc.

Esta técnica pode ser empregada em túneis de vento com uma relação comprimento : altura da câmara de ensaios a partir de cinco. Um ou diversos jatos de ar, com bocal de saída circular ou retangular, lançando os jatos paralela, perpendicular ou obliquamente à corrente de ar longitudinal (a partir do piso ou das paredes do túnel), têm sido usados, em geral, conjuntamente com obstáculos sólidos, por Gandemer (1973), Nagib et al (1976) e outros pesquisadores, conforme descrito em Hunt e Fernholz (1975). Teunissen (1972, 1975) utilizou um grande número de jatos lançados longitudinalmente para obter o perfil de velocidades médias. A turbulência adequada é conseguida com obstáculos sólidos.

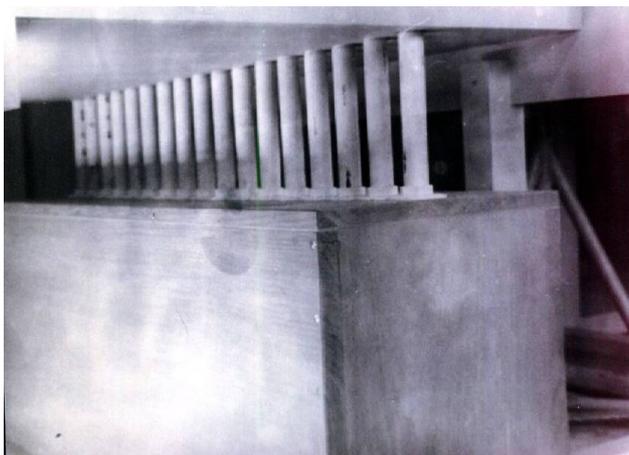


Figura 22. Fotografia do dispositivo emissor de jatos do túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

Resultados de um experimento realizado com a utilização da referida técnica são descritos por Blessmann (1977). Os ensaios foram realizados em um pequeno túnel de vento de baixa velocidade, com intensidade da turbulência de 0,3% e uma secção de trabalho de 322 mm × 253 mm (largura × altura) por 2070 mm de comprimento. O aparato experimental consistia de um conjunto de 15 tubos, com 8 mm de diâmetro interno e afastamento de 20 mm entre eles, dispostos perpendicularmente ao piso do túnel de vento.

Foram estudadas as seguintes características do vento artificialmente gerado: (i) perfis de velocidade média; (ii) intensidades locais e normalizadas da componente longitudinal da turbulência; (iii) escala da componente longitudinal da turbulência; (iv) espectro de potência da componente longitudinal da turbulência. Os resultados são apresentados para as secções II, III e IV da Figura 23 para uma relação entre a velocidade inicial média do jato e a velocidade longitudinal média do túnel de vento, $R=3$. As velocidades médias, intensidades e escalas da turbulência são apresentadas nas Figuras 24, 25, e 26. Um estudo comparativo da intensidade da turbulência com

valores obtidos em medições reais é dado nas Figuras 27, 28 e 29, e os espectros de potência nas Figuras 30, 31 e 32.

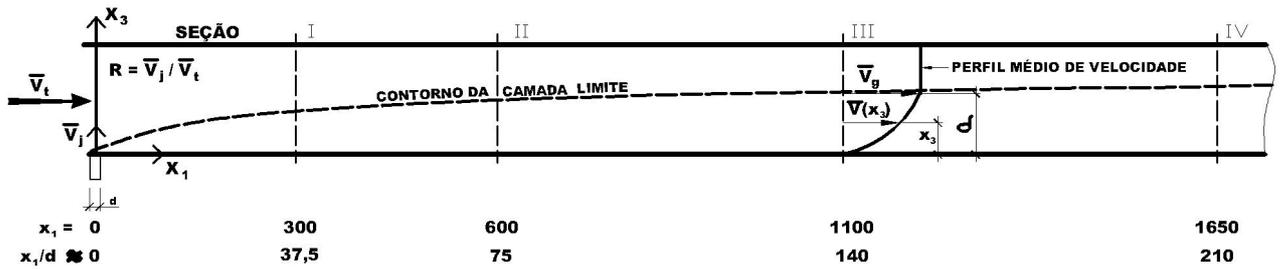


Figura 23. Localização das secções das medidas das características do vento e informações relevantes (Blessmann, 1977).

Os resultados mostram que para a secção IV (Fig. 26) o perfil está razoavelmente bem simulado para uma lei de potência, mas o mesmo não ocorre para as secções II e III (Fig. 24 e 25). Para as intensidades da turbulência, as simulações são comparadas com medidas reais nas localidades de Sale (Templin, 1969), Brookhaven (Standen, 1972) e Rugby (Harris, 1968, 1970), além de medidas em túnel de vento (Davenport e Isyumov, 1967a, 1967b) (Fig. 27, 28 e 29). As simulações são razoáveis nas secções III e IV, tanto para as intensidades como para as escalas da turbulência. Os espectros foram medidos para três alturas diferentes e foram comparados com os espectros devidos a Davenport (1964, 1967) e Harris (1968, 1970), sendo considerados adequados (Fig. 30, 31 e 32). Os resultados demonstraram a possibilidade do uso isolado de jatos transversais para simular as características dos ventos naturais.

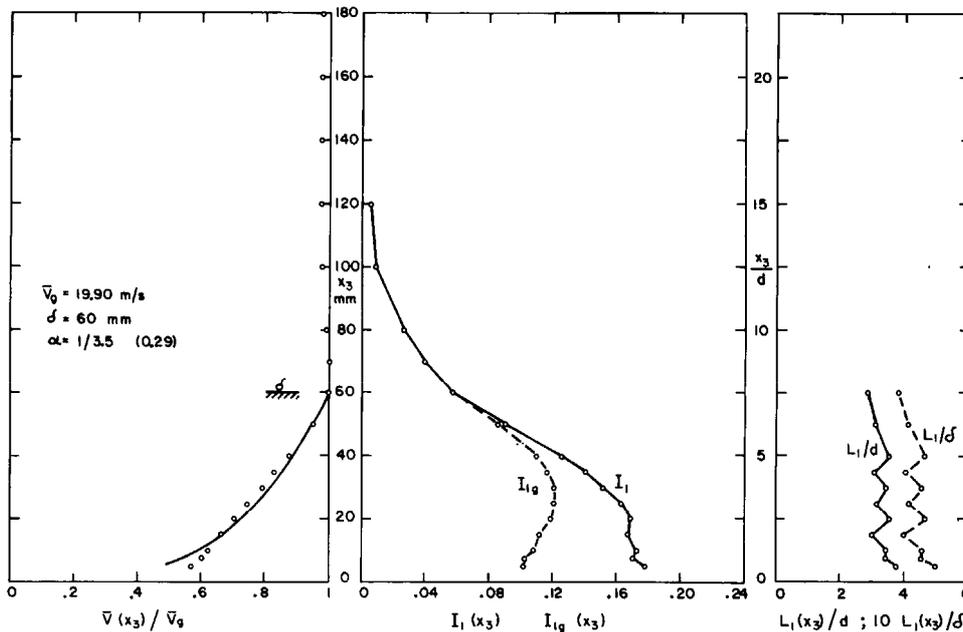


Figura 24. Perfil de velocidades médias, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência para a secção II (Blessmann, 1977).

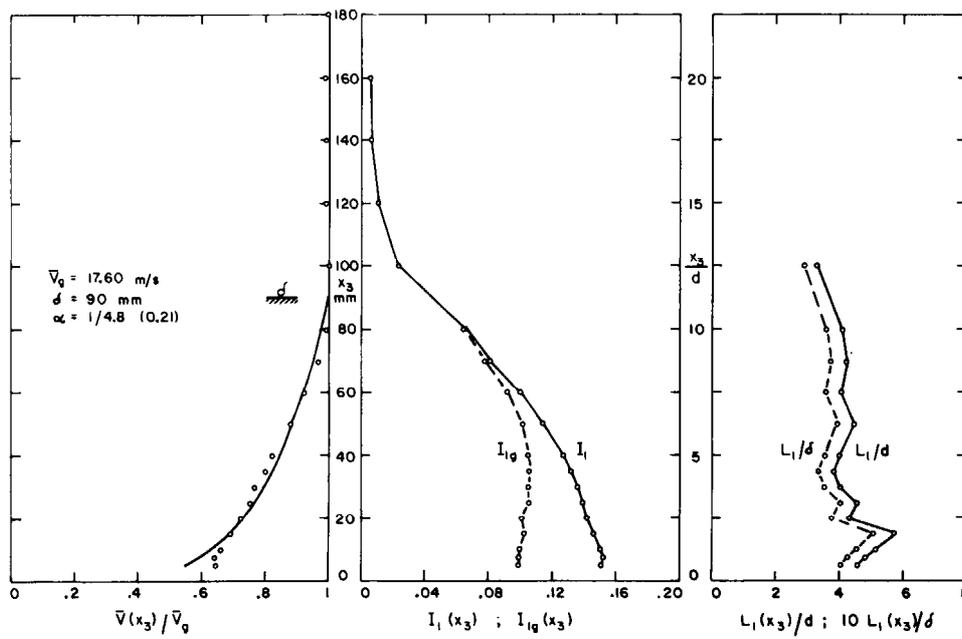


Figura 25. Perfil de velocidades médias, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência para a secção III (Blessmann, 1977).

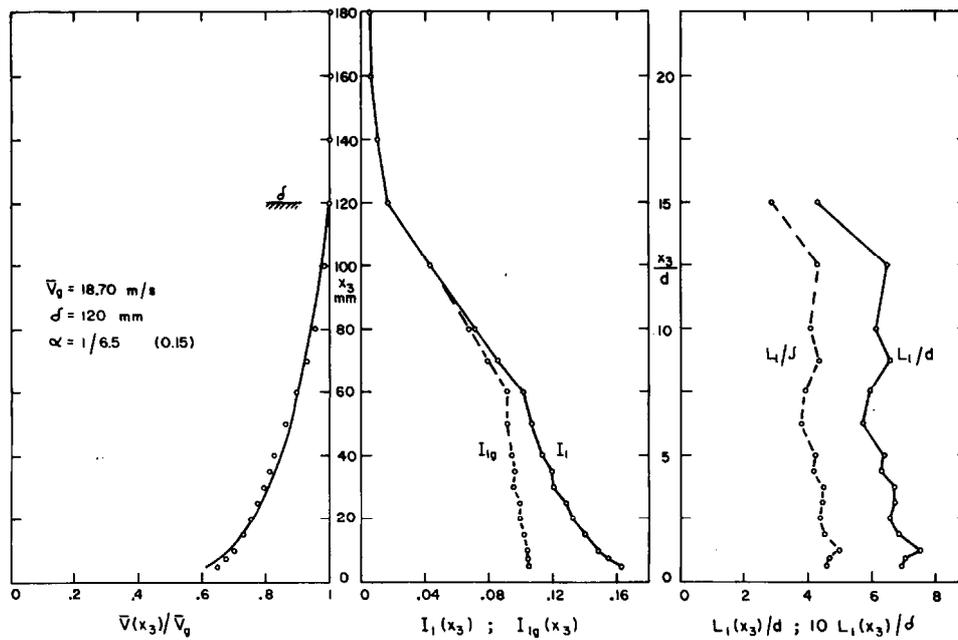


Figura 26. Perfil de velocidades médias, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência para a secção IV (Blessmann, 1977).

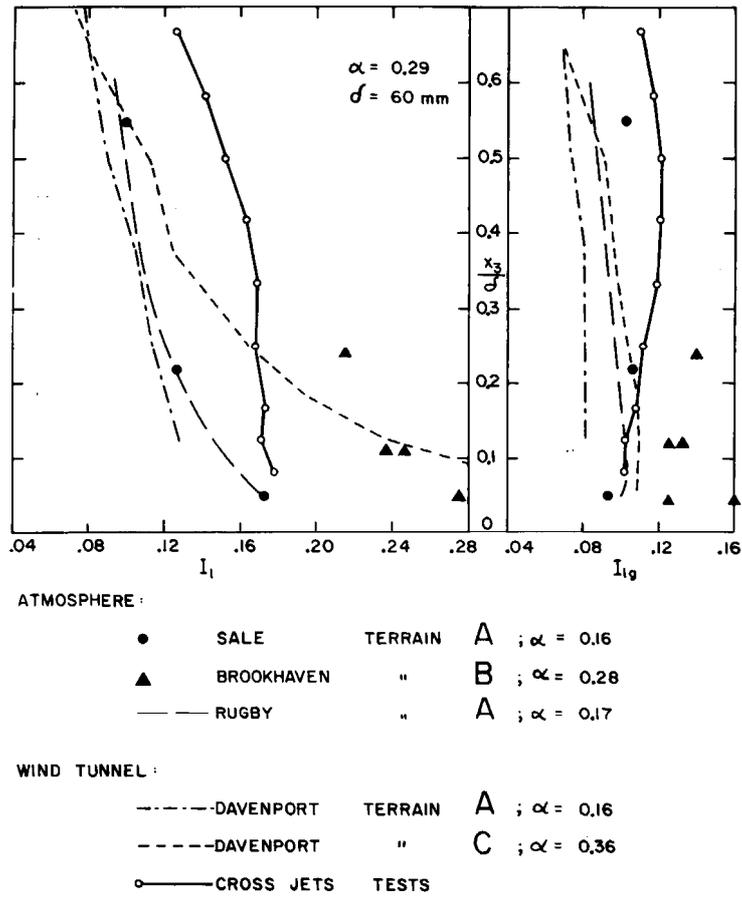


Figura 27. Intensidade da componente longitudinal da turbulência para a secção II (Blessmann, 1977).

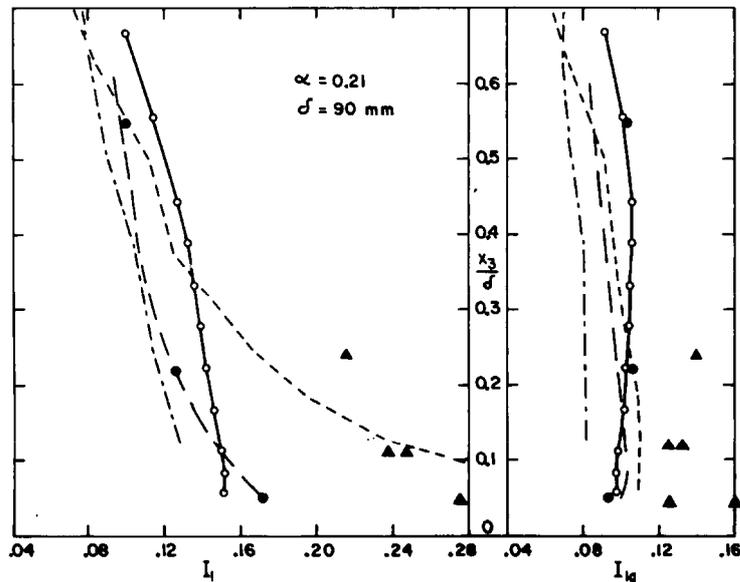


Figura 28. Intensidade da componente longitudinal da turbulência para a secção III (Blessmann, 1977).

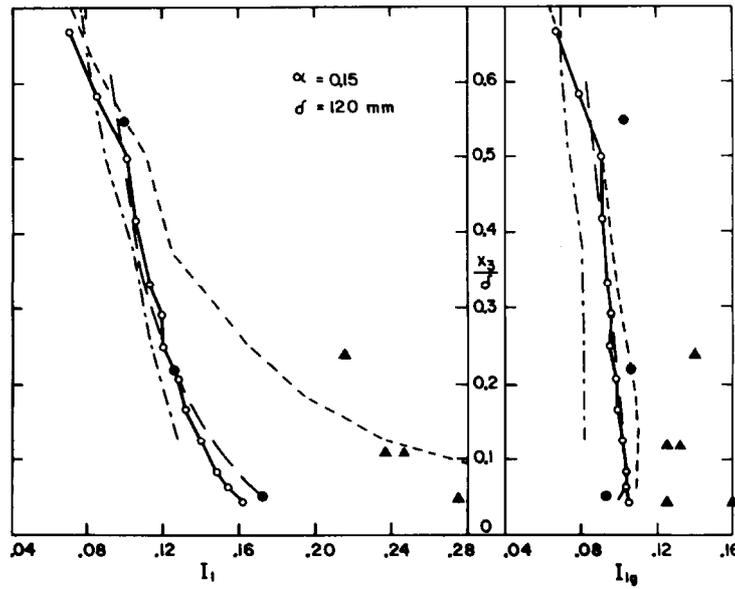


Figura 29. Intensidade da componente longitudinal da turbulência para a secção IV (Blessmann, 1977).

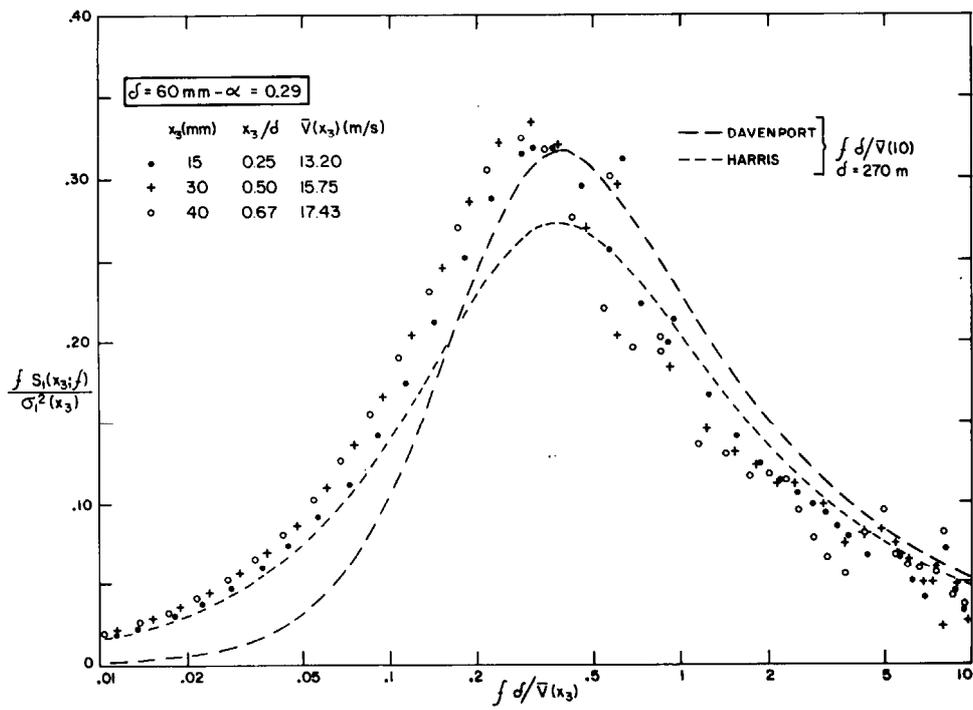


Figura 30. Espectro de potência da componente longitudinal da turbulência para a secção II (Blessmann, 1977).

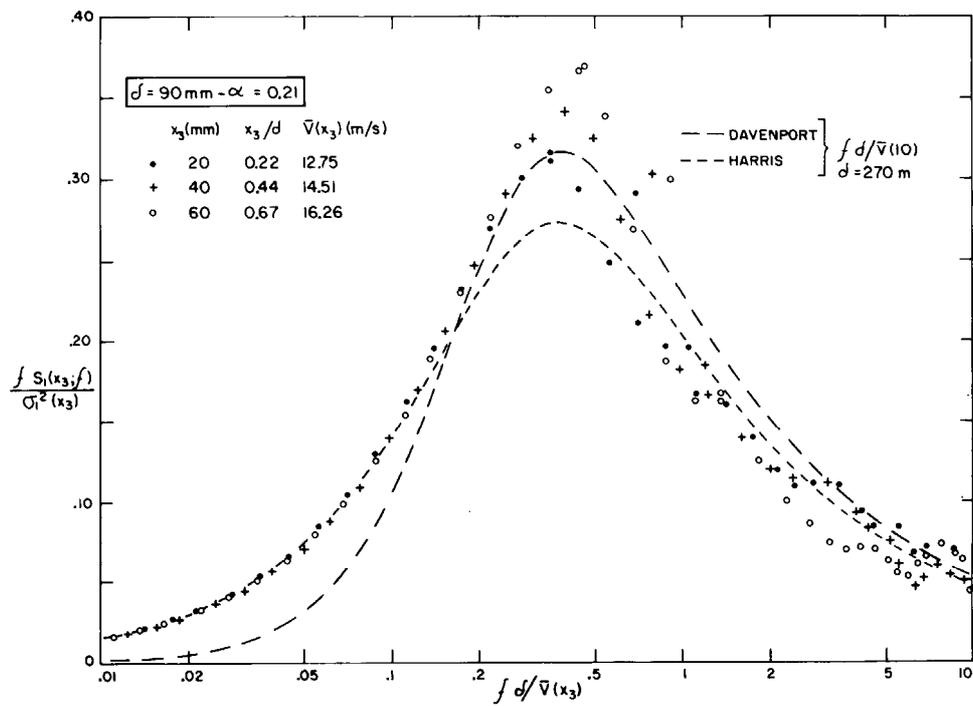


Figura 31. Espectro de potência da componente longitudinal da turbulência para a secção III (Blessmann, 1977).

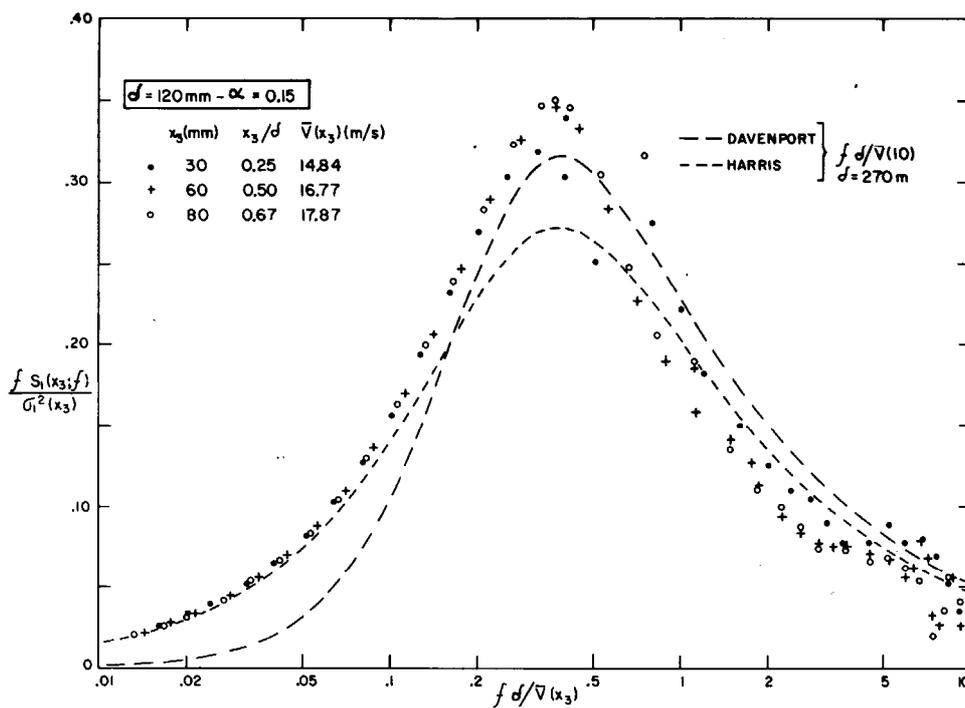


Figura 32. Espectro de potência da componente longitudinal da turbulência para a secção IV (Blessmann, 1977).

Quando maiores escalas de turbulência são necessárias, Bienkiewicz et al. (1983) descrevem um método de geração de grandes turbilhões através de aerofólios oscilantes. Porém esta metodologia não tem apresentado os resultados práticos esperados e poucos pesquisadores a utilizam.

4.3 Combinação de métodos ativos e passivos

A utilização de métodos que combinam dispositivos de mistura, barreira, elementos de rugosidade no piso do túnel e um conjunto de 17 jatos dispostos perpendicularmente ao eixo do túnel são apresentados por Blessmann (1982), em simulações realizadas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As características do escoamento foram determinadas para a mesa M-II do túnel de vento. A Figura (33) mostra os perfis de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência. Os dados experimentais do perfil de velocidades médias são comparados com um perfil de lei potencial de expoente $p = 0,32$.

Espectros de potência da componente longitudinal da turbulência são mostrados na Figura (34) e comparados com o espectro atmosférico sugerido por ESDU (1982), proposto originalmente por von Kàrmàn (Templin, 1969), conforme Eq. (4). A escala da turbulência foi obtida através da expressão $L_{x,u \text{ pico}} = \bar{U}(z) / 2\pi f_{\text{pico}}$, onde f_{pico} representa a frequência correspondente ao pico do espectro.

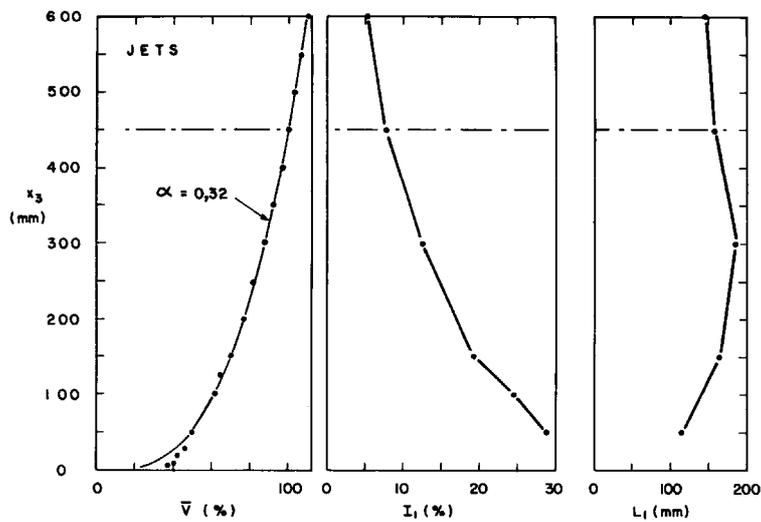


Figura 33. Perfis de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência para o eixo vertical da mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, para simulação combinada com jatos e elementos fixos.

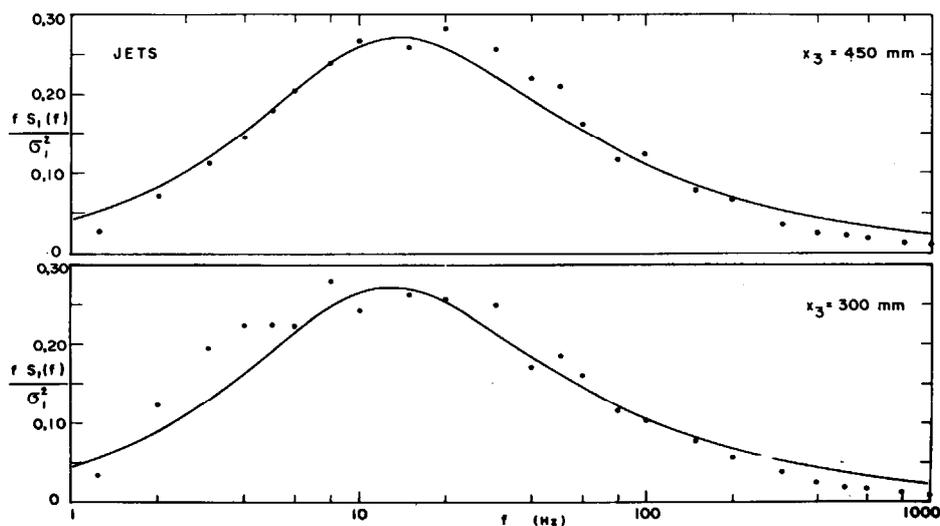


Figura 34. Espectros da componente longitudinal da turbulência para o eixo vertical da mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, para simulação combinada com jatos.

A escala da simulação é de aproximadamente 1:300 considerando-se os valores obtidos para a escala integral da turbulência. O comprimento de rugosidade, z_0 , determinado a partir da distribuição das velocidades médias, foi de 12 mm.

5. Simulação de um local específico

Arranjos aleatórios ou regulares dos elementos de rugosidade utilizados nos métodos de simulação produzem as características corretas do escoamento geral aproximando-se de um determinado local. Entretanto, as condições neste local específico são mais fortemente influenciadas pelo terreno local de entorno do que pelo terreno mais afastado a barlavento. Em uma área urbana o local pode ser diretamente afetado por edificações vizinhas. A partir de uma certa distância do local, torna-se necessário alternar de uma simulação genérica para uma representação detalhada do local, usualmente chamada de “modelos de vizinhança”. A construção de modelos detalhados da vizinhança consome tempo e é onerosa, particularmente para zonas urbanas. Se uma área muito pequena é representada, os resultados não irão refletir com precisão as condições do local. Se uma área muito grande é representada, com o intuito de incluir todos os modelos de vizinhança na mesa de ensaios, a escala linear pode tornar-se muito pequena. É necessário, portanto, que seja adotada uma abordagem racional para este problema, sendo indicados os trabalhos de Pasquill, 1972; Cook, 1972; Beddingfield, Lapraik, 1970; Newberry, Obee, 1971. Exemplos de modelagens de locais específicos e simulação genérica da camada limite são mostrados na Figura 35 (Loredo-Souza, 2003, 2004).



Figura 35. Modelagem da camada limite e do local específico para prédios construídos em Novo Hamburgo, RS, Brasil (Loredo-Souza, 2004) e São Paulo, SP, Brasil (Loredo-Souza, 2003).

Várias são as aplicações na área de Engenharia do Vento, além das aplicações clássicas em estruturas e elementos de revestimento de edificações. Destacam-se os estudos de dispersão de poluentes (Wittwer et al., 2002), dispersão de partículas sólidas por efeito do vento (Fig. 36), (Schettini, Loredo-Souza, 2004), conforto de pedestres (Loredo-Souza, Schettini, 2003) e helipontos (Fig. 37), (Schettini, Loredo-Souza, 2002).



Figura 36. Simulação do transporte de partículas de carvão (Schettini, Loredou-Souza, 2004).



Figura 37. Modelo reduzido do empreendimento *SP Wellness*, para o estudo das condições aerodinâmicas na região dos helipontos (Schettini, Loredou-Souza, 2002).

6. Agradecimentos

Os autores agradecem aos membros das equipes do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, e do Laboratório de Aerodinâmica de Construcciones da Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina, pela valorosa colaboração no trabalho desenvolvido ao longo destes anos. Os autores desejam expressar um especial agradecimento aos professores Jacek Piotr Gorecki e Joaquim Blessmann, bem como ao Téc. Paulo Francisco Bueno.

7. Referências

- Armitt, J. and Counihan J., 1968, The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 1968, 2 49—71.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988, NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- Bienkiewicz, B., Cermak, J. E., Peterka, J. A. and Scanlan, R. H., 1983, Active modeling of large-scale turbulence. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1983, 13, 465-475.
- Blessmann, J., 1972, Comunicação sobre um Novo Processo para Simulação. em Túnel Aerodinâmico, de Características de Ventos Naturais. In: REGIONAL CONFERENCE ON THE

- PLANNING AND DESIGN OF TALL BUILDINGS, Varsóvia, 27/30 nov.. *Proceedings...* v.1, p.396-9.
- Blessmann, J., 1972, Obtenção de Perfis de Velocidade Média em Túnel de Vento. *Revista Brasileira de Tecnologia*, São Paulo, 3(4) :219-28, dez.
- Blessmann, J., 1973, *Simulação da Estrutura do Vento Natural em um Túnel Aerodinâmico*. Tese apresentada no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, para obtenção do título de Doutor em Ciências. São José dos Campos, 16 out.
- Blessmann J., 1977, The use of cross-jets to simulate wind characteristics. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1977, 2(1), 37-47.
- Blessmann, J., 1982, The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10. pp. 231-248.
- Blessmann, J., 1990, *Aerodinâmica das Construções*. 2. ed. Ed. Sagra, Porto Alegre.
- Blessmann, 1995 *O vento na engenharia estrutural*. Ed. da Universidade / UFRGS. Porto Alegre.
- De Bortoli, M. E., Natalini, B., Paluch, M.J., Natalini, M. B., 2002, Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90 (2002) 281-291.
- Cermak J. E., 1975, Applications of fluid mechanics to wind engineering; a freeman scholar lecture. *Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering*, 97(1) :20, Mar.
- Cermak J. E., 1977, Wind tunnel testing of structures. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Engineering Mechanics Division*, 1977, 103 1125— 1140.
- Cermak J E., 1982, Physical modeling of the atmospheric boundary layer in long boundary-layer wind tunnels. *Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*. (Ed: Reinhold 1 A), pp. 97—125. Cambridge, Cambridge University Press, 1982.
- CIRSOC, 1984, CIRSOC 102: Acción del Viento Sobre las Construcciones, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Diciembre.
- Cook N. J., 1972, On applying a general atmospheric simulation method to a particular urban site for ad-hoc wind loading or wind environment studies. *Atmospheric Environment*, 8, 85-87.
- Cook N. J., 1973, On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 1973, 7 691—705.
- Cook, N. J., 1977, Determination of the Model Scale Factor in Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2 (1977/1978) 311-321.
- Cook N. J., 1978, Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1978, 3 157— 176.
- Cook N J., 1982, Simulation techniques for short test-section wind tunnels; roughness, barrier and mixing-device methods. *Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*. (Ed: Reinhold T A), pp. 126— 136. Cambridge, Cambridge University Press.
- Cook, N. J., 1985, The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification, Building Research Establishment report, London, 1985.
- Cook, N. J., 1990, The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures. (Building Research Establishment). London, UK.
- Counihan, J., 1969, An Improved method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel, *Atmospheric Environment*, 3 (1969) 197-214.
- Counihan, J., 1971, Wind Tunnel Determination of the Roughness Length as a Function of the Fetch and the Roughness Density of Three-Dimensional Roughness Elements, *Atmospheric Environment*, 3 (1971) 637-642.
- Counihan J., 1973, Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 1973, 7 673—689.
- Davenport, A. G., 1964, The buffeting of large superficial structures by atmospheric turbulence, *Annals of the New York Academy of Sciences*, New York, June, Vol. 116, pp.135-159.
- Davenport, A. G., 1967, The dependence of wind loads on meteorological parameters. Proc. Int. Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, Ottawa, Sept., Vol. 1, pp. 19-82.

- Davenport, A. G., Isyumov, N., 1967a, The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading. In: Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1. Pp. 201-230.
- Davenport, A. G., Isyumov, N., 1967b, A wind tunnel study of a proposed 53-story building for the Seattle-First national Bank Building, Seattle, The University of Western Ontario, London, Canada, Engineering Science Research report BLWT-1-67.
- Elder J W., 1957, Steady flow through non-uniform gauzes of arbitrary shape. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, 5 355—368.
- Engineering Sciences Data Unit (1982) “Strong winds in the atmospheric boundary layer, Part 1: mean hourly wind speeds. Data item 82026”. London, ESDU.
- Franck, N., 1963, Model law and experimental technique for determination of wind loads on buildings. In: SYMPOSIUM ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 16, Teddington, Grã-Bretanha, 1963. National Physical Laboratory, v.1, Paper 15, p. 181-96 .
- Gandemer, J., 1973, La soufflerie à couche limite turbulent du CSTB. *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, 1193(141), juil./août.
- Harris, R. I., 1968, Measurements of wind structures at heights up to 598 ft above ground level, Proc. Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures, University of Technology, Loughborough, April, Vol. 1, Paper 1.
- Harris, R. I., 1970, The nature of the wind, Proc. Seminar on the Modern design of Wind-Sensitive Structures, London, UK, June, pp. 29-55.
- Hunt, J. C. R. & Fernholz, H., 1975, Wind tunnel simulation of the atmospheric boundary layer; a report on Euromech 50. *Journal Fluid Mechanics*, Londres, 70(3):543-59, Aug.
- Irwin, H.P.A.H., 1981, The Design of Spires For Wind Simulation, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 7 (1981) 361-366.
- Jensen, M. & Franck, N., 1963, *Model scale tests in turbulent wind*. Copenhagen, The Danish Press, Part 1.
- Jensen, M. & Franck, N., 1965, *Model scale tests in turbulent wind*. Copenhagen, The Danish Press, Part 2.
- Lawson T. V., 1968, Methods of producing velocity profiles in wind tunnels. *Atmospheric Environment*, 1968, 2 73—76.
- Loredo-Souza, A. M., 2003, *Ação do vento sobre o Edifício L'Essence Jardins, São Paulo*. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico**. Porto Alegre. Maio.
- Loredo-Souza, A. M., 2004, *Ação estática do vento sobre o Edifício Sunset Residence, Novo Hamburgo, RS*. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico**. Porto Alegre. Julho.
- Loredo-Souza, A.M., Schettini, E.B.C., 2003, Estudo em tunel de vento das condições de conforto de pedestres para o Edifício *New Century - SP*, Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico**. Porto Alegre. Março.
- Nagib H M, Morkovin M V, Yung J T and Tan.Atichat J., 1976, On modelling of the atmospheric surface layers by the counter-jet technique. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 1976, 14, 185-190.
- Owen P R and Zienkiewicz H K., 1957, The production of uniform shear flow in a wind tunnel. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, 2 521—531.
- Pasquill, F., 1972, Some aspects of boundary layer description. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98, 469-494.
- Robins A G., 1979, The development and structure of simulated neutrally stable atmospheric boundary layers. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1979, 4 71—100.
- Schettini, E.B.C., Loredo-Souza, A.M., 2002, Estudo aerodinâmico das características do vento na região dos helipontos do Prometo *SP Wellness – Alphaville*, Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico**. Porto Alegre. Maio.

- Schettini, E.B.C., Loredou-Souza, A.M., 2004, Estudo em túnel de vento dos efeitos de proteção propiciados por telas porosas ao transporte eólico de partículas de carvão. Fase II – Caracterização do escoamento e início da erosão em uma pilha de carvão isolada com tela de proteção - CVRD, Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico**. Porto Alegre. Junho.
- Schon, J. P, & Mery, P., 1971, A preliminary study of the simulation of neutral atmospheric boundary layer using air injection in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 5(5): 299-311, May.
- Standen, N.M., 1972, A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels. Laboratory Technical Report LA-94. Ottawa, National Aeronautical Establishment.
- Stull, R. B., 1998, "An introduction to boundary layer meteorology", Kluwer Academic Publishers.
- Teunissen, H. W., 1972, *Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel*. Canadá, University of Toronto. UTIAS Report 182.
- Teunissen, H. W., 1975, Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel. *Atmospheric Environment*, Oxford, 9:145-74.
- Tieleman H W, Reinhold T A and Marshall R D., 1978, On the wind-tunnel simulation of the atmospheric surface layer for the study of wind loads on low-rise buildings. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1978, 321—38.
- Templin, R.J., 1969, Interim progress note on simulation of earth's surface winds by artificially thickened wind tunnel boundary layers. National Aeronautical Establishment, Ottawa, Laboratory technical Report LTR-LA-22.
- Wittwer, A. R., Camaño Schettini, E. B., Loredou-Souza, A. M., Modelado físico del viento atmosférico en un túnel de viento a muy baja velocidad, Anais da III Escola de Transição e Turbulência, Florianópolis, UFSC, 2002. Vol. 1. pp. 20 - 25
- Wittwer, A. R., Loredou-Souza, A. M., Camaño Schettini, E. B., 2002, Simulación de la capa límite para estudios de dispersión atmosférica en túnel de viento. In: XXV Reunión de Trabajo de la ASADES, Anais XXV Reunión de Trabajo de la ASADES, Buenos Aires, 2002. Vol. 1, pp. 10 – 15.
- Wittwer, A. R., Möller, S. V., 2000, Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 84(2000) 307-320.
- Schettini, E.B.C., Loredou-Souza, A.M., 2002, Estudo aerodinâmico das características do vento na região dos helipontos do Prometo *SP Wellness* – Alphaville, Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico**. Porto Alegre. Maio.