

TV-1 TÚNEL-DE-VENTO DA ESCOLA DE ENGENHARIA MAUÁ UTILIZADO NA DISCIPLINA “INTRODUÇÃO À ENGENHARIA”. PARTE-2: SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

Ricardo Montefusco

Instituto Mauá de Tecnologia, Habilitação Engenharia Civil

Praça Mauá 1

CEP: 09580-900, São Caetano do Sul - SP

ricardo_montefusco@maua.br

Resumo: *Para um jovem que decide-se pela profissão de engenheiro e ingressa na universidade, esta deve estar preparada para: ajudá-lo a decidir-se pela especialização profissional, motivá-lo nos estudos, ensinar a tomar decisões, a ter postura e atitudes éticas bem como orientá-lo para que, depois de formado, atinja a realização profissional. Para auxiliar na busca destes e de tantos outros objetivos é que há alguns anos atrás, na Escola de Engenharia Mauá, foi criada uma disciplina chamada “Introdução à Engenharia”. Como predicados básicos, essas aulas deveriam propiciar motivação ao estudante, aguçar sua curiosidade e interesse pela ciência e pela técnica mostrando a realidade em cada campo de atuação e propiciar aplicações práticas imediatas permitindo a participação efetiva dos alunos, objetivando desenvolver um raciocínio adequado para resolução de futuros problemas de engenharia. Este artigo ilustra um processo de simulação moderno da camada limite atmosférica conhecido genericamente como “método de rugosidade, barreira e dispositivo de mistura” (COOK, 1990) ao mesmo tempo que, dada sua obtenção, ou seja, da tal camada limite, permitirá aprimorar a prática da experimentação com a simulação de modelos do efeito estático do vento nas construções. Aprimoramento esse, consequência de uma aquisição de dados mais precisa e real, da complexa ação do vento nas edificações.*

Palavras-chave: *Túnel-de-Vento, Introdução à Engenharia, Camada limite atmosférica, Criatividade, Ensino.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 A disciplina “Introdução à Engenharia”

“O papel do engenheiro dentro de uma sociedade mais justa e moderna é fundamental. Um profissional criativo, empreendedor e voltado para os desafios científico-tecnológicos, deve contribuir muito para a qualidade de vida dos cidadãos. Para o setor produtivo industrial, também, o grande desafio atual recai sobre o engenheiro, pois, nesta era de evolução tecnológica, antes de tudo, os melhores produtos são as **boas idéias**.” (BAZZO, 1997).

É incontestável que a engenharia moderna depende sim, cada vez mais, dos conhecimentos científicos e dos desenvolvimentos tecnológicos, porém jamais vai prescindir do empirismo e principalmente de uma característica altamente desejável para um bom desempenho profissional: **a criatividade**.

Tomemos, por um instante, um jovem, que decide-se por uma das grandes áreas, no que tange à sua carreira profissional. Logo terá a noção de que é longo o período de preparação, se esta grande área for, por exemplo, a Engenharia.

Segundo BAZZO (1997), em algum momento, portanto, no início do curso, o aluno precisa ter acesso a informações que o permitam **encontrar-se com a profissão escolhida e imaginar-se nela**. Isto só acontecerá quando ele puder inseri-la no seu próprio contexto pessoal, o que é responsabilidade de um **processo educacional**.

Uma disciplina como “**Introdução à Engenharia**” não pode substituir a orientação vocacional que não se teve, mas pode fornecer várias das informações que o aluno necessita para alimentar o seu processo de formação profissional.

O aluno deve sentir que pertence, desde o início, ao curso por ele escolhido e compreender a necessidade e a importância dos diferentes conteúdos didáticos que lhes serão repassados.

Uma disciplina como “**Introdução à Engenharia**” pode cumprir o papel de integrar o aluno ao curso, na medida em que nela se pode: mostrar quais são as disciplinas componentes, qual a área de atuação do profissional da engenharia, a sua postura perante a sociedade, a evolução histórica da engenharia, o procedimento a ser adotado em uma pesquisa científico-tecnológica, como estudar para conseguir melhor rendimento, como abordar um problema, etc.

Na formulação de uma disciplina como esta, portanto, deve-se ter em mente que um curso de engenharia também objetiva **estimular a criatividade** do indivíduo, **fornecer-lhe ferramenta básica** para enfrentar problemas com os quais se deparará na sua profissão e **estimular uma postura crítica e consciente** visando sempre o progresso e o bem estar da sociedade.

A qualidade de um curso depende, então, não somente da qualidade do estudante que nele ingressa, mas, sobretudo, de um clima geral da instituição, que **favoreça os estudos**, que **estime a criatividade** e que **instigue os estudantes a progredir**.

2. HISTÓRICO

2.1 A origem dos trabalhos

De posse de todas essas premissas é que então, há alguns anos atrás, surgiu por parte da Superintendência de Desenvolvimento e Planejamento da Escola de Engenharia Mauá a feliz idéia de se criar uma disciplina de caráter peculiar, a ser inserida no curso fundamental da 1ª série, que fosse a tradução de todos esses conceitos, os quais poderiam ser implementados e aperfeiçoados paulatinamente. A disciplina, com duração de um ano como são as demais disciplinas da Escola de Engenharia Mauá, se chamaria “**Introdução à Engenharia**”.

Todos os que se envolveram com tal projeto, após a escolha de um tema, direcionaram seus esforços no sentido de preparar e colocar em atividade, num prazo relativamente curto, a Disciplina assim idealizada.

Como predicados básicos, a serem seguidos por todos, numa primeira instância, as aulas de Introdução à Engenharia deveriam ter um forte caráter motivante, pois, entre outros, entendeu-se que este também deve fazer parte de um curso moderno de Engenharia. Além disso, deveriam: envolver um pouco de história, relacionando a evolução da modalidade em questão, propiciar aplicações práticas imediatas, permitindo a participação efetiva dos alunos, comentar e/ou mostrar tecnologia de ponta, referida ao experimento a ser desenvolvido, e, sobretudo, situar de maneira clara e honesta a participação do engenheiro na sociedade atual e o respectivo campo de trabalho em cada uma das referidas modalidades. Foram criados os

chamados Módulos de Introdução à Engenharia e a cada um dos atuais sete módulos estaria associado a uma modalidade específica de Engenharia ministrada pela Escola.

A estimativa prevista, e que se verifica até os dias de hoje, é que de 400 a 500 alunos matriculados na 1ª série fariam, por exemplo, o Módulo de Introdução Civil.

Com uma programação das aulas bastante dinâmica que se inicia com a apresentação da habilitação aos alunos, onde se comenta e se ilustra várias facetas desta modalidade de engenharia, as aulas e experimentos são programados com uma quantidade de informações atualizadas, material didático, audiovisuais, palestras, construção de modelos e pesquisa.

2.2. A concretização de uma idéia

Para compor o Módulo de Introdução à Engenharia Civil particularmente, deixamo-nos levar por uma idéia e pelo menos dois objetivos. **A idéia:** os problemas aerodinâmicos, no campo da aeronáutica, da automobilística e mesmo das construções, fascinam até hoje. Quanto aos **objetivos:** o primeiro e o principal, trazer essa tecnologia ao conhecimento e ao alcance do nosso alunado propiciando motivação e ao mesmo tempo associando-a com os conceitos que fossem possíveis do ensino fundamental ressaltando também, como já mencionado, a prática da multidisciplinariedade e o segundo, de acompanhar pesquisas nessa área de alta tecnologia.

Construímos, então, um túnel-de-vento (Figura 1). Meses de estudos e pesquisa e outros tantos para construção e testes. Com a colaboração das oficinas: mecânica, elétrica e marcenaria da Escola de Engenharia Mauá, no interregno de um ano já podíamos acionar uma hélice de 1,0m de diâmetro impulsionada por um motor elétrico de 7,5 HP controlado por um inversor de frequência, obtendo um fluxo de ar bem comportado dentro da câmara de ensaio e podendo atingir uma velocidade de pico de 25m/s.



Figura 1 – Túnel-de-Vento TV-1 na sala da Introdução à Engenharia da E.E.M.

Paralelamente ao projeto e a construção do túnel, o qual foi sendo aperfeiçoado na medida de sua utilização, uma série de outros instrumentos externos a ele foram elaborados e incorporados ao laboratório, com o intuito de se mostrar ao aluno como o conhecimento de certos fenômenos e princípios básicos de certas disciplinas possibilitam a construção de um equipamento, no caso o Túnel-de-Vento, que tem por finalidade dar ao homem mais segurança no cálculo de suas estruturas.

3. O TÚNEL-DE-VENTO.

Em linhas gerais, um túnel aerodinâmico é uma instalação geradora de uma corrente de ar artificial, com características especiais, destinada à simulação experimental de certos tipos de escoamentos reais. A qualidade de um túnel aerodinâmico como instrumento depende do rigor com que se obtém as características do escoamento experimental fixadas a priori, da precisão com que se realizam as necessárias operações de manobra e regulação, e da facilidade e economia da sua exploração.

Com o advento dos túneis aerodinâmicos, o estudo das forças atuantes num modelo, submetido à ação de uma corrente de ar aproximadamente uniforme e permanente, tornou-se ato contínuo e prática sistemática dos laboratórios de engenharia aeronáutica. Entretanto, a Engenharia Civil parecia disposta a minimizar a importância dos problemas de ação do vento e, deste modo, a possibilidade de progresso tecnológico que a existência de túneis aerodinâmicos lhe proporcionava. Com efeito, apesar de muitos túneis existentes poderem fornecer indicações preciosas quanto às forças eólicas atuantes nas construções, só em raros casos isolados se tomou a precaução de fazer estudo aerodinâmico de construções civis.

O trabalho publicado por Dryden e Hill (1933) sobre o ensaio de um modelo do Empire State Building é exemplo típico do que se acaba de expor.

Em 1940, a destruição total da grande ponte de Tacoma Narrows nos Estados Unidos, fez com que se iniciasse uma nova fase na aplicação da aerodinâmica à engenharia civil. Esse colapso gerou o estímulo suficiente para que cientistas como Von Kármán, Ackeret e tantos outros se interessassem pelo estudo do comportamento aerodinâmico dos tabuleiros de pontes suspensas.

Sabe-se, no entanto, que o vento natural é intrinsecamente distinto do escoamento no interior de uma câmara de ensaios de um túnel-de-vento aerodinâmico convencional, apresentando não só forte variação dos valores médios das suas grandes características em função da altura acima do solo, mas também, caráter aleatório das flutuações no tempo dessas mesmas grandezas. Isto significa que os problemas aerodinâmicos da engenharia civil são, em geral, extremamente complexos, requerendo para sua solução a utilização de equipamento laboratorial dispendioso e a utilização de técnicas de medição muito delicadas. Assumem também igual relevância os problemas relacionados com o conforto e a higiene dos usuários de edifícios de vias públicas em que o vento natural se apresenta freqüentemente como fator de importância capital.

4. SEQUÊNCIA DOS TRABALHOS

Nessa linha de ação, visando, portanto, um aperfeiçoamento e conseqüente avanço na prática da experimentação com simulação de modelos e posterior análise e interpretação dos resultados, reiniciamos os estudos com o túnel-de-vento partindo por obter a camada limite turbulenta numa escala que seja possível medições adequadas e, portanto, mais precisas das pressões nos modelos.

Dentre os métodos existentes de simulação da camada limite atmosférica em túneis-de-vento, optou-se a princípio, pelo método passivo conhecido genericamente como “método de rugosidade, barreira e dispositivo de mistura” (COOK,1990), que neste artigo será descrito.

5. TIPOS/CONCEPÇÃO DO TÚNEL-DE-VENTO DA E.E.M.

Túneis meteorológicos e túneis projetados para teste em edificações, são **subsônicos**.

Nestes, utilizados na Engenharia Civil, a compressibilidade do ar é desprezível. Segundo Fox; Mc Donald (1985), para número de Mach menor que 0,3, as variações na densidade atingem apenas 2% do valor médio, e a compressibilidade do ar pode ser desprezada.

Um valor $M = 0,3$ no ar em condições normais (padrão) corresponde a uma velocidade de aproximadamente 100 m/s.

Para túneis de baixa velocidade, onde a compressibilidade é desprezível, observa-se que existem dois tipos básicos: o de circuito aberto e o de circuito fechado.

O primeiro pode ser do tipo **Eiffel**, quando a câmara de ensaio é aberta, ou **NPL**, quando a câmara é fechada. Estes nomes se devem ao engenheiro francês Gustav Eiffel e ao laboratório britânico National Physical Laboratory onde se originaram.

O Túnel-de vento TV-1 da E.E.M. é de circuito aberto e câmara fechada sendo composto por um trecho de entrada de ar chamado de efusor onde ocorre uma contração e conseqüente direcionamento e aceleração do ar até a câmara de ensaio, (parte central) seguido de um trecho final de saída desse mesmo ar, de maneira controlada, chamado de difusor.

Segundo Cermak(1989), existem quatro tipos básicos de ensaios em túneis-de-vento que fornecem dados aos engenheiros civis para projeto de estruturas: **RPM, RL-FBM,RH-FBM e AM**. O Quadro 1, lista os diferentes tipos e as medidas efetuadas.

Quadro 1 - Tipos de ensaio em túneis-de-vento e dados medidos (CERMAK, 1989)

TIPOS DE ENSAIO	DADOS MEDIDOS
1. Modelo rígido de pressão estática (RPM)	a. Pressão média, máxima e mínima. b. Velocidade média do vento e efetiva. c. Pressões instantâneas.
2. Modelo rígido com balança de baixa frequência (RF-FBM)	a. Forças e momentos médios.
3. Modelo rígido com balança de alta frequência (RH-FBM)	a. Forças e momentos médios de natureza dinâmica.
4. Modelo aeroelástico (AM)	a. Momentos e deslocamentos. b. Aceleração

O túnel-de-vento TV-1 da E.E.M., tem o objetivo de realizar ensaios tipo **RPM** em modelos de edificações. Além disso, também é utilizado para fins didáticos, sendo um instrumento capaz de introduzir os alunos nos estudos do vento com a norma brasileira, ”Forças devidas ao Vento em Edificações”, NBR 6123 .

6. A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

6.1. Fundamentos

Entende-se por camada limite atmosférica a região da troposfera que é diretamente afetada pela presença da superfície da Terra e responde a interações superficiais com escalas de tempo em torno de uma hora ou menos. Essas interações além das modificações do escoamento, induzidas pela topografia, incluem: arrasto, evaporação e evapotranspiração, além de transferência de calor e emissão de poluentes. A espessura da camada limite atmosférica corresponde à chamada altura gradiente (z_g).

As primeiras pesquisas sobre a profundidade dessa camada ou altura gradiente, como também é conhecida, para ventos moderadamente fortes, era estimada em torno de 500 m. Sabe-se hoje que, para ventos fortes, um valor típico de z_g excede os 2000 m, mas que este depende 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 à camada limite atmosférica é tão grande que se espera que o escoamento seja turbulento. Para ventos fortes, com velocidades médias horárias superiores a 10m/s, (36km/h) o escoamento é suficientemente turbulento para que a mistura produzida suprima os efeitos térmicos e a camada limite atmosférica possa ser tratada como adiabática e neutralmente estável. Essas hipóteses podem ser aplicadas à maioria dos escoamentos de interesse de simulação em túnel-de-vento, como estudo de cargas sobre estruturas e alguns casos de dispersão de poluentes.

A transferência de quantidade de movimento na camada limite atmosférica é dada, fundamentalmente, pelas tensões aparentes de Reynolds ou também chamadas tensões turbulentas. O comportamento desta tensão define duas camadas dentro da camada limite atmosférica: a camada superficial e a camada Ekman. A camada superficial é aquela região 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 interfacial, microcamada, subcamada viscosa ou laminar (Figura 2), onde o transporte molecular domina frente ao transporte turbulento. A espessura dessa subcamada é chamada de “plano de deslocamento zero” e se denota por z_0 , e a altura média da rugosidade é z_d (que se denota também por h_R ou simplesmente d) em correspondência a média das alturas das edificações e/ou obstáculos.

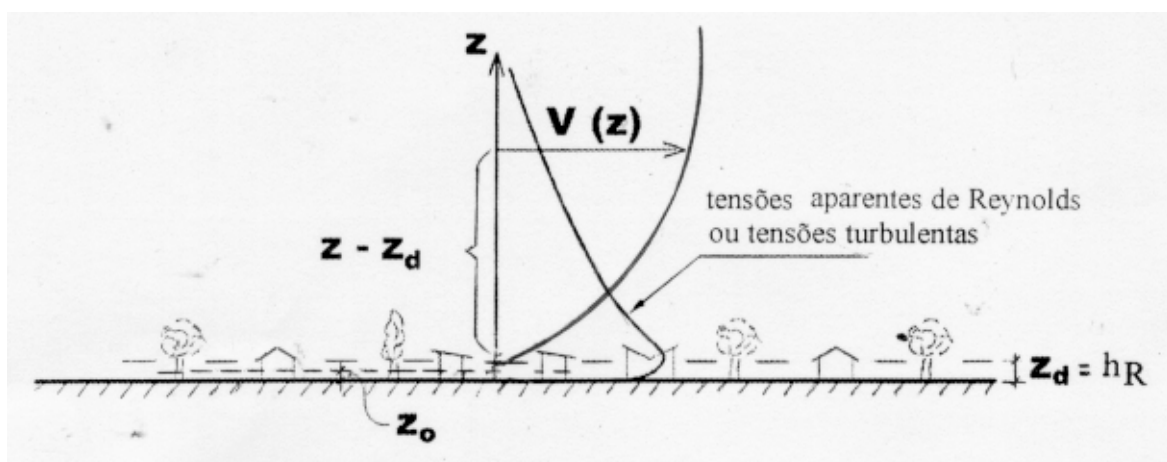


Figura 2 – Perfil de velocidade média, tensões e camadas características do vento.

Para os casos de cidades, onde a rugosidade é dada pelos edifícios e vegetação, o vento tende a passar por cima dos mesmos estabelecendo-se regiões de estagnação entre eles.

6.2. Camada Limite turbulenta

É a zona mais importante para as aplicações da aerodinâmica à engenharia civil, uma vez que a maioria das superfícies expostas a um fluxo de ar estão cobertas por esse tipo de camada limite, e é nela que pode-se dar o fenômeno de separação.

Na câmara de ensaios do túnel-de-vento, onde se procura manter a pressão estática praticamente constante, essa camada tende a estender-se indefinidamente. Naturalmente, sua espessura também vai crescendo e geralmente atinge espessuras várias vezes maiores que a camada limite laminar. Esta última citada, é a que aparece no início de qualquer escoamento de um fluido em contato com uma superfície sólida. As linhas de corrente se inclinam pouco em relação à superfície sólida e o fluxo é laminar, mesmo para superfície áspera, quer o fluxo a barlavento seja laminar ou turbulento (desde que a aspereza e a turbulência não sejam exageradamente grandes). A razão deste fenômeno parece ser que uma camada limite fina e com fortes gradientes de pressão não permite a manutenção de redemoinhos existentes no movimento turbulento. A velocidade se anula a uma distância muito pequena da superfície. Sua existência é explicada pela ação da viscosidade: o gradiente de velocidade nesta fina camada é muito grande, de modo que a tensão tangencial atinge um valor elevado, impedindo a formação dos redemoinhos que originam a turbulência. A variação de velocidade é aproximadamente linear. Existe uma segunda zona, seguindo o escoamento, onde a velocidade é variável com o tempo em cada ponto. Esta variação aumenta para sotavento, até se transformar em turbulência plenamente desenvolvida. É uma zona de transição muito pequena na qual a camada limite cresce rapidamente. A seguir vem então a zona onde o escoamento é turbulento e a espessura da camada limite aumenta ainda mais. Nela, as linhas de corrente (linhas tangentes em cada ponto ao vetor velocidade) são menos inclinadas que o contorno da própria camada de modo que algumas delas penetram em seu interior.

As linhas de corrente, citadas anteriormente, são baseadas, não nas velocidades instantâneas, mas sim, na velocidade média sobre um curto período, em cada ponto. Desde que o período de tempo para cálculo da velocidade média seja consideravelmente maior do que o período de flutuação média, a velocidade média em um ponto verdadeiramente representa o movimento primário, uma vez que o valor médio das flutuações da velocidade é zero em qualquer direção. **Portanto, sempre que se tratar de escoamento turbulento, a forma do fluxo a ser considerada é a forma média, baseada na velocidade média em cada ponto.** Outro ponto importante a ser considerado é que a pressão no interior da camada limite é determinada pelo escoamento circundante. Em uma seção normal ao escoamento, a pressão pode ser considerada constante e igual a do escoamento circundante. **Portanto, a camada limite não causa alteração nos valores das pressões efetivas e que conduzem ao cálculo dos coeficientes aerodinâmicos.**

6.3. Influência da rugosidade superficial

A rugosidade de uma certa superfície em contato com um fluido em movimento, influi, pela resistência de atrito principalmente quando a camada limite é turbulenta

Naturalmente, a rugosidade do terreno controla o valor da tensão de cisalhamento e por conseguinte, a chamada velocidade de atrito ou corte, u^* . Quanto mais rugosa for a superfície, maior será a tensão de cisalhamento junto à superfície e maior será o déficit da quantidade de movimento na camada limite atmosférica. A distância necessária para que um perfil sobre um 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 diferente.

7. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM TÚNEIS-DE-VENTO

O comprimento por si só da câmara de ensaio de um túnel-de-vento (em torno dos 4m de extensão, no caso do TV-1), pode não ser o suficiente para simular as características do vento natural na escala do modelo. O crescimento natural da camada limite é relativamente lento, dependendo da rugosidade da superfície (ou terreno). Mesmo em túneis mais longos, os maiores fatores de escala obtidos estão em torno de 1:500, sendo necessário algum dispositivo artificial a ser utilizado para aumentar a espessura da camada limite, de maneira a se obter escalas maiores (COOK,1990). A simulação do vento natural na escala do modelo pode ser feita cobrindo-se um comprimento considerável do piso do túnel com material de rugosidade adequada. 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 apropriada (Figura 3). Este dispositivo corresponde à principal fonte de turbulência de baixa altitude de ventos em condição de estabilidade neutra.

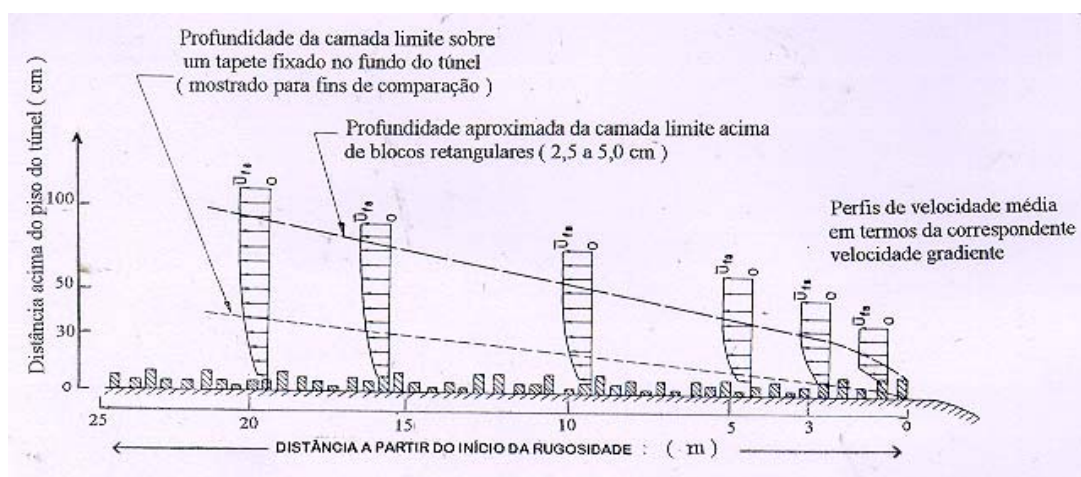


Figura 3 - Simulação do crescimento natural da camada limite atmosférica

Pode-se, também, colocar obstáculos à barlavento do modelo, em geral, no início da câmara de ensaio como: telas curvas ou planas de largura variável, grelhas de malha variável ou ainda triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados. Simulações mais precisas das características do vento podem ser obtidas pela combinação de um ou mais dos obstáculos acima descritos com blocos disseminados ao longo da câmara de ensaio, o que a princípio, foi feito (método passivo). Outra técnica de simular as características do vento natural é através de jatos de ar lançados perpendicularmente, ou mesmo de uma maneira oblíqua à corrente de ar gerada pelo túnel. Esse método (método ativo), possui a vantagem de não diminuir a velocidade média do ar no túnel-de-vento como acontece com a utilização de corpos sólidos.

O desenvolvimento dos métodos de simulação tem aumentado sua precisão. A partir dos elementos habitualmente usados em simulações modernas, foram cunhados os nomes genéricos “métodos de rugosidade, barreira e dispositivos de mistura” (COOK,1990).

Um arranjo típico dos dispositivos de simulação é mostrado na Figura 4 a qual corresponde a uma simulação em torno de 1:250 pelo método 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.

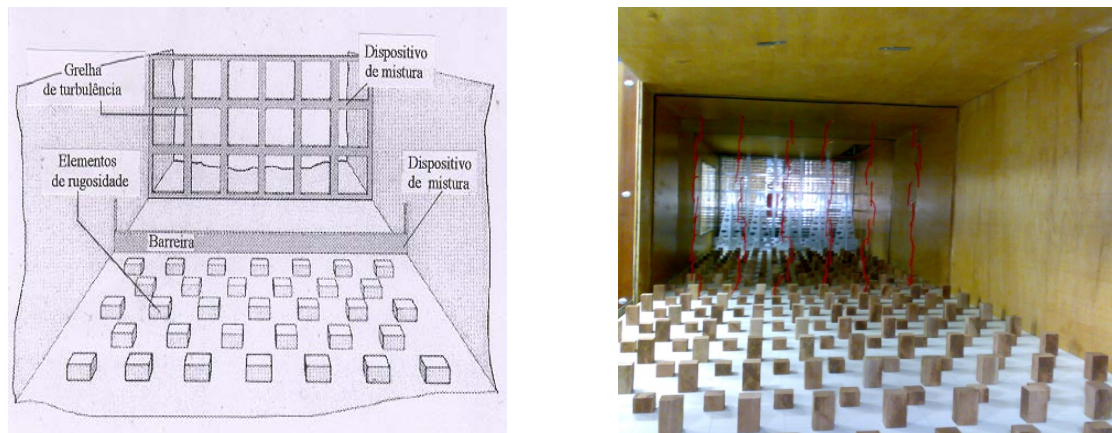


Figura 4– Arranjo típico com elementos físicos para simulação da turbulência.

Conforme o dispositivo usado, são reproduzidas uma ou algumas das características da turbulência, tais como: intensidade da turbulência, escala da turbulência, espectro, curva de autocorrelação, etc. Dependendo do tipo de estrutura e da finalidade do ensaio esta simulação parcial pode ser suficiente. Por exemplo: uma grelha e rugosidade no piso podem gerar uma corrente de ar com perfil de velocidades médias adequado e com uma turbulência com estrutura satisfatória. Este último arranjo descrito e mostrado na Figura 4, gera turbulência uniforme, sendo que neste caso somente a região de superfície é representada na simulação (COOK, 1973).

8. PERFIS DE VELOCIDADE MÉDIA MAIS UTILIZADOS

A condição que estabelece a similaridade da turbulência no túnel de vento e na natureza, vem da relação entre a rugosidade das superfícies internas ao túnel e da natureza.

O vento, em níveis próximos ao piso, é quase sempre turbulento e essa turbulência em seu escoamento só depende da rugosidade da superfície quando a atmosfera está em equilíbrio neutro, isto é, quando não existe nenhuma contribuição térmica para a turbulência.

Existem basicamente duas formas de perfis de velocidades médias utilizados na área de Engenharia de Vento: o perfil logarítmico e o perfil em lei de potência. O primeiro, amplamente aceito, trás que, o perfil de velocidade média varia logaritmicamente na camada limite dinâmica (turbulenta), além do que, apresenta um bom ajuste na camada próxima ao solo. O perfil logarítmico é descrito pela expressão abaixo:

$$\frac{V(z)}{U^*} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

$V(z)$ é a velocidade na altura z ,

U^* é a velocidade de corte (ou de atrito, como também é chamada, “friction velocity”),

sendo; $U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ onde, τ_0 é a tensão de cisalhamento na superfície e ρ a densidade. Esta

depende da natureza da superfície e da velocidade média.

K é a constante de Von Kàrmàn, cujo valor adotado é em geral, de 0,4,

z_0 é o comprimento de rugosidade aerodinâmica que corresponde a altura acima da superfície onde a velocidade teórica é igual a zero.

É acima desta altura que o fluxo se inicia, sendo uma pequena porcentagem da altura real dos elementos de rugosidade, e podendo variar consideravelmente função do layout e do tipo de rugosidade. Esse perfil de velocidades se aplica igualmente para fluxo sobre terrenos complexos bem como para terrenos planos, apesar dos efeitos de topografia afetarem indubitavelmente a forma do perfil. Em escala semi-log, esta lei é representada por uma reta de declividade $1/K$ ($\approx 2,5$) com ordenada na origem z_0 função do tipo do terreno.

A rugosidade aerodinâmica, que caracteriza a rugosidade local do terreno, define a intersecção do perfil de velocidades médias com o “plano de deslocamentos zero”, como é chamada a espessura dessa sub-camada. Para o caso de cidades, onde a rugosidade é dada pelos edifícios e vegetação, o vento tende a passar por cima dos mesmos originando regiões de estagnação (abrigadas) entre eles. O deslocamento entre os edifícios é local e inteiramente dependente da geometria, não podendo ser estabelecidas características gerais.

Para densas configurações de rugosidade, onde as seções mais baixas destas não experimentam mudanças de turbulência e nenhum efeito de fluxo ocorre, uma nova variável deve ser introduzida para levar tal fato em consideração. Essa variável é a altura d , do “plano de deslocamento zero”, que é a região acima do solo onde as trocas turbulentas começam a ocorrer. Isto efetivamente desloca a superfície do chão de uma certa distância (altura) dentro da rugosidade. A equação fica:

$$\frac{v(z)}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2)$$

que é uma versão empírica da versão original para modelar um fluxo sobre uma superfície rugosa. A alta densidade dos elementos nesse caso freqüentemente não permitem o fluxo. Para uma densa cobertura, como por exemplo, o caso de uma floresta compacta, o fluxo esperado passa sobre o topo dos elementos e então o valor de d se aproxima de h_r (altura média de todos os elementos de rugosidade) como se observa nas Figuras 5 e 6.

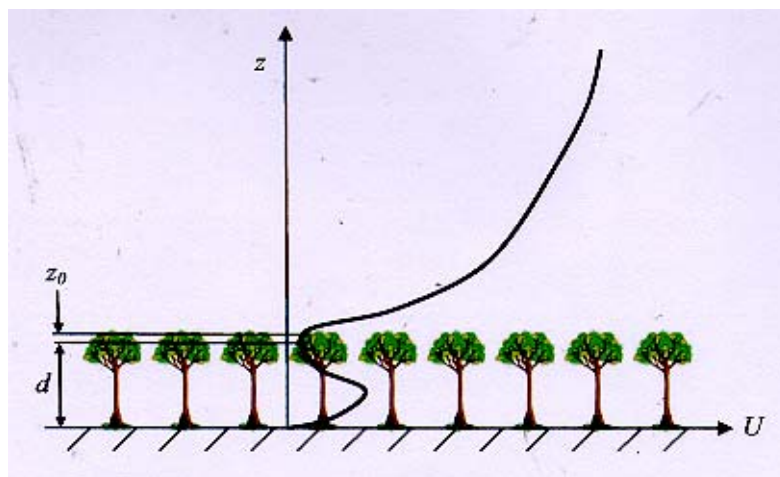


Figura 5 - Fluxo sobre uma densa cobertura florestal.

Um fluxo separado pode ocorrer dentro de uma região coberta (dentro da camada d), mas isto não tem qualquer efeito no fluxo médio que ocorre acima da cobertura, como também se observa na figura anterior. No caso de elementos com arranjos espaçados, o valor de d , aproxima-se de zero e o fluxo ocorrerá logo acima deste. O valor de d , dentro do perfil de

velocidades, não altera a forma do perfil, apenas o desloca no sentido positivo do eixo z de um valor d .

O perfil de velocidades original é usado para superfícies que, por exemplo, são cobertas por um baixo nível de vegetação, onde z_0 é representação apropriada para a altura de rugosidade e é freqüentemente de poucos centímetros. A equação modificada, apresentada, foi desenvolvida para áreas cobertas por colheitas, arvores e edifícios. Na maioria dos estudos de ocorrência de rugosidades naturais, tem sido razoável considerar $d=2/3h_r$.

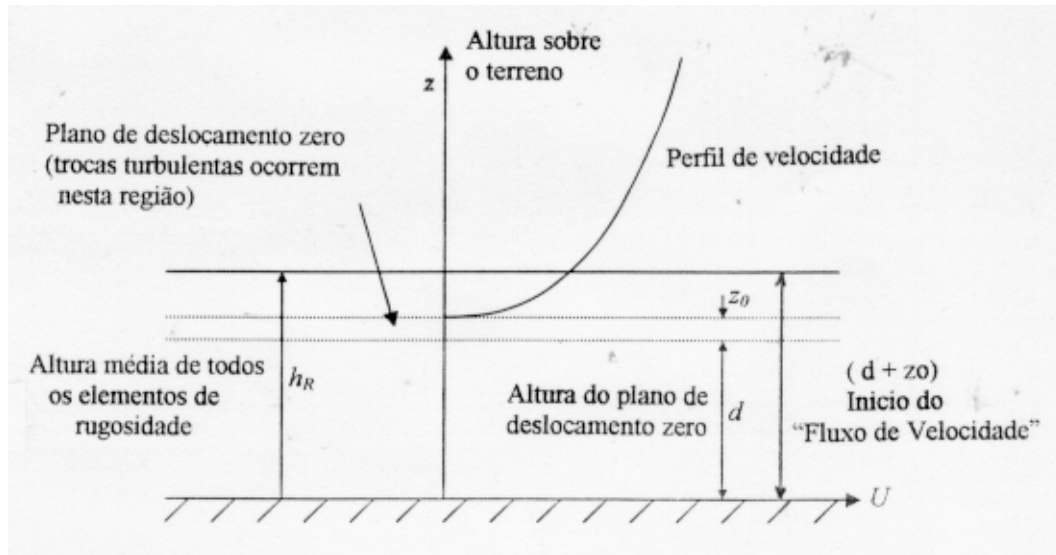


Figura 6 – Configuração das superfícies (camadas) sobre o terreno.

Quanto a condição de obtenção de similaridade entre o fenômeno no modelo de testes e o correspondente fenômeno na natureza, é que, o parâmetro de rugosidade no “chão” do túnel z_0 , deve ser escalado para o parâmetro de rugosidade na natureza, Z_0 ;

$$\frac{z_0}{Z_0} = \frac{d_m}{D} \quad (3)$$

onde d_m e D são as correspondentes dimensões do objeto no túnel e em relação ao da natureza. Obviamente o modelo deve estar totalmente imerso na camada limite turbulenta no chão do túnel.

Algumas situações do fluxo conduzem a dificuldades matemáticas na solução do perfil de velocidades logarítmicas e, então, pode ser mais fácil descrever o perfil médio por uma função simples de potência, referida à altura, como segue:

$$\frac{V(x)}{V(ref.)} = \left(\frac{x-d}{x_{ref}} \right)^p \quad (4)$$

Em escala log-log, esta equação representa uma reta de declividade p , que descreve bem a camada limite atmosférica, com exceção da região muito próxima da superfície. Em termos práticos, corresponde a valores de $(z-d)$ de 10m para campo aberto e 30m 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 à 0,34 para cidades com grande densidade de prédios altos. Esta lei, porém, tem o inconveniente de não reconhecer o topo da camada limite atmosférica e a velocidade do vento aumenta indefinidamente. Resumindo, e a bem da verdade, nenhuma das duas leis (logarítmica e da potência), são validas completamente em

toda região “overlap” da camada limite (Figura 7). O perfil logarítmico é mais apropriado para as regiões mais baixas enquanto a lei da potência é melhor acima da “overlap”.

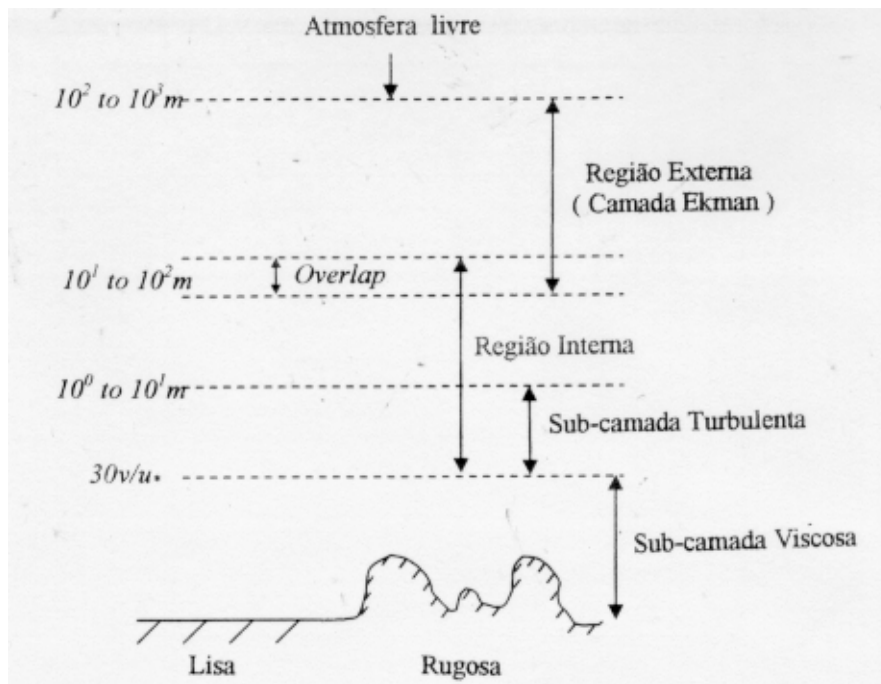


Figura 7 - Estrutura da Camada Limite Atmosférica (Brutsaert,1982)

9. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

9.1 Calibração

A calibração consiste em determinar as características do escoamento na câmara de ensaio e proceder às correções necessárias. A característica do escoamento na câmara de ensaio fica determinada quando se conhece, basicamente, a distribuição de velocidade na seção transversal e a variação da pressão estática ao longo da mesma.

Ao se simular a camada limite atmosférica, a distribuição de velocidade deve seguir o perfil de velocidade da atmosfera na escala do modelo. O mesmo acontece com o nível de turbulência. Neste trabalho, levantou-se, a princípio, alguns perfis de velocidade na câmara de ensaio para estabelecer a velocidade média de funcionamento e observar a formação das respectivas camadas limites.

9.2 Levantamento dos perfis de velocidade

Nesta etapa, procurou-se levantar alguns perfis de velocidade média variando o tipo de rugosidade através de combinações entre os dispositivos de mistura como: telas, barreiras, torres e os elementos de solo, anteriormente descritos, de maneira a se constatar e comparar as velocidades e as respectivas alturas das camadas limites formadas. Isto levará, entre outros, ao cálculo das possíveis escalas a serem utilizadas na confecção dos modelos para os futuros ensaios. Os perfis de velocidade, a princípio levantados, são de um plano vertical central coincidente com a posição dos modelos normalmente instalados no túnel. Embora um anemômetro de fio quente seja um instrumento bastante adequado para o levantamento destes

perfis em um túnel-de-vento; utilizou-se um tubo de Pitot já existente da marca DWYER-USA tipo M-400-10-S (de densidade de fluido 0,826) considerado de boa precisão e que veio a atender as exigências ao longo dos primeiros 45 cm de altura da câmara de ensaios (de um total de 70 cm). Foram registradas as velocidades a cada 0,5 cm nas camadas mais inferiores e a cada 1,0 cm nas restantes.

As dimensões relativas entre a altura e o comprimento da câmara de ensaios do TV-1 é de 1:5. Comprimento considerado mínimo para os tipos de ensaios a que se pretende realizar. Estas dimensões são em parte compensadas pela velocidade do vento nele gerado (velocidade de pico de 90 km/h com câmara livre). Velocidade suficientemente alta para permitir a medida das pressões estáticas médias com multimanômetros a óleo, sem a necessidade do emprego, por exemplo, de transdutores elétricos.

Foram feitas, a princípio, 03 (três) combinações com os elementos de rugosidade construídos: Combinação - 1: mantiveram-se a grade, as torres, a barreira e os elementos de piso.

Combinação - 2: mantiveram-se apenas os elementos de piso.

Combinação - 3: mantiveram-se todos os elementos de rugosidade exceto as torres.

Para cada uma dessas combinações foram testadas 03 (três) velocidades diferentes: $V_1=10\text{m/s}$; $V_2=15\text{m/s}$ e $V_3=20\text{m/s}$, onde se pode observar a simetria dos vários escoamentos, bem como a altura da camada limite formada na região de ensaios dos modelos, que variou de 24cm à 43cm. A Figura 8 mostra o ensaio com as três velocidades para a combinação - 3.

Em relação à 3ª combinação de rugosidade, ou seja, a que tem todos os elementos exceto as torres, foi construído o gráfico ($\ln z \times V_{rel.}$) mostrado na Figura 9, de maneira a se determinar o valor do parâmetro de rugosidade z_0 , que é a medida da rugosidade da superfície referida, e ao mesmo tempo, da turbulência na camada limite sobre a superfície, tanto que, uma camada limite mais espessa corresponde a uma superfície de maior rugosidade.

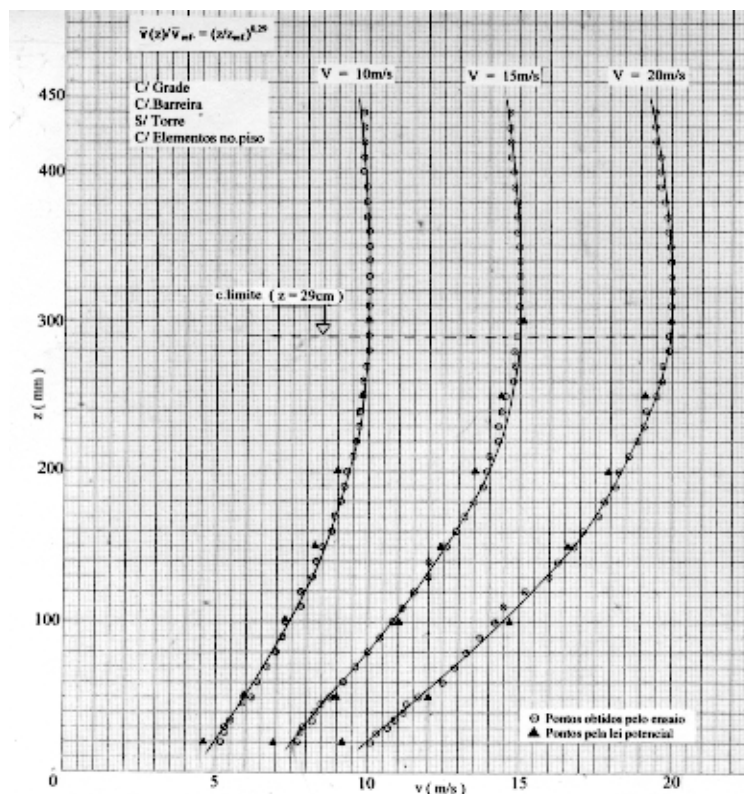


Figura 8 - Velocidades médias com todos os elementos de rugosidade exceto as torres.

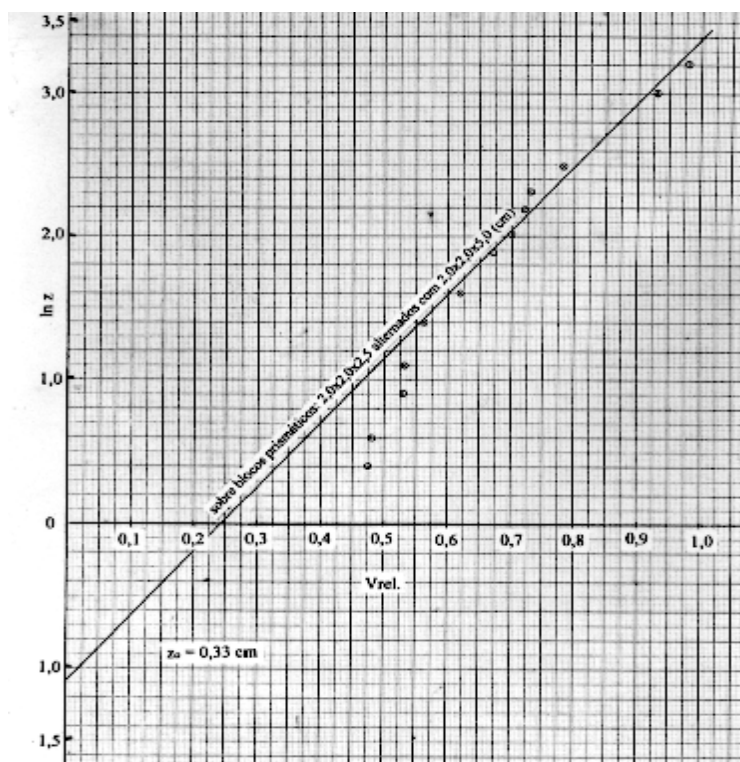


Figura 9 – Gráfico $\ln z$ x $V_{rel.}$ para a determinação do parâmetro de rugosidade ($z_0=0,33\text{cm}$)

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O túnel-de-vento, é um aparelho usado em simulações que estuda o comportamento aerodinâmico de objetos ou estruturas imersos em correntes (interação fluido-estrutura). Alguns ensaios foram mostrados neste trabalho e tantos outros estão sendo programados, além daqueles que, regularmente, são executados durante as aulas de “Introdução à Engenharia” do curso fundamental na graduação da E.E.M. e que foram descritos no primeiro trabalho com este tema apresentado à COBENGE de 2004 com o título: Disciplina “Introdução à Engenharia”: Análise e Avaliação.

Prossegue-se assim, com um dos principais objetivos desde a sua construção; que é de trazer ao alunado da graduação em engenharia, não somente o conhecimento e o acompanhamento de pesquisa nessa área de alta tecnologia, e operacionalização do túnel; que ele compreenda a importância que existe em saber os fundamentos da Física e Mecânica dos Fluidos para aplicação imediata em um experimento prático com finalidade de resolver problemas reais de Engenharia.

Os próximos passos a serem desenvolvidos no laboratório, serão: a verificação do andamento da pressão estática ao longo de toda a câmara de ensaios, a comparação dos coeficientes de pressão C_{pi} obtidos de ensaios em estruturas (modelos) com a norma brasileira de vento e o levantamento de mais alguns perfis de velocidade média função de alterações na rugosidade do túnel.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZZO, W.A. **Introdução à Engenharia**. Florianópolis: UFSC, 1997. 272p.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 1ª Edição. Porto Alegre, UFRGS, 1983.

BORGES, A. R. J. **O Túnel Aerodinâmico do Laboratório Nacional de Engenharia Civil**. Lisboa, Revista TÉCNICA nºs 380,386 e 391, 1975.

COOK, N. J. **The designer's guide to Wind loading of building structures**. Part 2: Static Structures. London, UK. Building Research Establishment, 1990.

LOREDO-SOUSA, A. M. **Simulação da Camada limite Atmosférica em Túnel-de-Vento**. UFRGS, 2004.

NIELS, F. **Model Law and Experimental Technique for Determination of Wind Loads on Buildings**. Copenhagen, Denmark, p. 182-196, 1970.

STANGROOM, P. **CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain**. 2004. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. London.

TV-1 WIND TUNNEL OF SCHOOL OF ENGINEERING MAUÁ USED IN DISCIPLINE “INTRODUCTION TO THE ENGINEERING”. PART-2: SIMULATION OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

Abstract: *For a youth that decides for engineer's profession and he enters at university, this should be prepared for: to help him to decide for the professional specialization, to motivate him in the studies, to teach to make decisions, to have posture and ethical attitudes as well as to guide him so that, after having formed, reach the professional accomplishment. To aid in the search of these and of so many other objectives are that there are some years ago, in School of Engineering Mauá, was created a discipline called "Introduction to the Engineering". As basic predicates, those classes should propitiate motivation to the student, to sharpen his curiosity and interest for the science and for the technique showing the reality in each field of performance and to propitiate immediate practical applications allowing the participation executes of the students, aiming at to develop an appropriate reasoning for resolution of futures engineering problems. This article illustrates a modern simulation methods of the Atmospheric Boundary Layer known with the generic name "roughness, barrier and mixing-device methods" (Cooke, 1990) at the same time that, given it obtaining, in other words, of the such limit layer, it will allow to perfect the practice of the experimentation, with the simulation of models of the static effect of the wind in the constructions. Improvement that, consequence of a more necessary and real acquisition of data, of the complex action of the wind in the constructions.*

Key-words: *Wind tunnel, Introduction to the Engineering, Atmospheric boundary layer, Creativity, Teaching.*