



Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC

DECIV/PPGEC – UFRGS

90035-190 Porto Alegre, RS Brasil

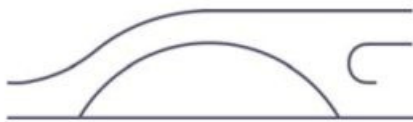
E-mail: lac@cpgec.ufrgs.br

Av. Osvaldo Aranha, 99 / 305

Fone / Fax : + 55 51 3316 7146

Home Page: www.cpgec.ufrgs.br/lac

Estudo da Ação do Vento sobre Trelaçados Seccional Brasil: Coeficientes de Arrasto para um Módulo de Torre



Estudo da Ação do Vento sobre Treliçados Seccional Brasil: Coeficientes de Arrasto para um Módulo de Torre

Equipe Técnica

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D.- University of Western Ontario, Canadá

Prof. Joaquim Blessmann
Dr.Sc. - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, Brasil

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr.techn. – Universität Innsbruck, Áustria

Eng. Gustavo Javier Zani Núñez, M.Sc.

Eng. Elvis Antonio Carpeggiani

Eng. Leandro Inácio Rippel

Téc. Paulo Francisco Bueno

Acad. Aloísio Maggi Fin

Acad. Renê André Muraro

Este relatório foi aprovado por:

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, Ph.D.
Eng. Civil, CREA/RS 69350
Diretor do LAC / UFRGS

Prof. Marcelo Maia Rocha, Dr. techn.
Eng. Civil , CREA/SC 5542

Porto Alegre, 15 de novembro de 2003



1. Introdução

Este trabalho apresenta os resultados referentes ao estudo em túnel de vento de um modelo reduzido seccional de uma torre *Seccional*. O objetivo do estudo foi a determinação dos coeficientes de arrasto para o trecho do módulo ensaiado o qual tem seção transversal triangular, sendo os montantes constituídos por colunas poligonais com dezoito lados, tronco-cônicas. O módulo testado é indicado no Anexo A.

Maiores níveis de segurança e confiabilidade são atingidos quando a consideração criteriosa dos efeitos do vento é feita a partir da etapa de concepção. Este processo preventivo é, geralmente, o de menor custo e o de maior eficiência. Por estas razões e por não existirem nas normas de vento coeficientes aerodinâmicos específicos para o segmento de torre estudado, foram realizados os ensaios em túnel de vento. A solicitante foi *Seccional Brasil S.A.* e os ensaios realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (Anexo B) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul [3, 4, 8].

2. Ação do vento em torres reticuladas

Existem duas maneiras de calcular a ação do vento em torres treliçadas:

a) O primeiro método consiste em determinar o carregamento em cada membro da torre separadamente, somando as forças individuais para obter a força total. Para isto deve-se conhecer as propriedades geométricas de cada elemento bem como seu coeficiente de força aerodinâmico e velocidade de projeto. Para uma torre típica, constituída de diversos elementos (barras prismáticas), este é um processo que consome muito tempo.

b) A outra maneira consiste em determinar as cargas do vento em partes ou trechos da estrutura contendo vários elementos de barras retas (reticulados). Estas partes são aqui chamadas de módulos, e os coeficientes de força devem estar disponíveis para estas configurações específicas. A força total é também obtida a partir da soma das forças parciais, porém de uma maneira mais prática e rápida em relação ao processo descrito em (a) acima.

As torres *Seccional* são constituídas por alguns membros com arestas vivas e por outros constituídos por superfícies curvas. Todos os corpos constituídos por superfícies curvas são altamente sensíveis ao parâmetro chamado número de Reynolds, o qual influencia a forma do escoamento e, conseqüentemente, a distribuição de pressões e a força exercida sobre o sólido imerso no escoamento. O número de Reynolds é definido como $Re = V l / \nu$, sendo V a velocidade do vento, l uma dimensão característica e ν a viscosidade cinemática do ar, a qual pode ser considerada aproximadamente constante para pequenas variações de temperatura. Então, para uma determinada dimensão característica l , Re depende fundamentalmente da velocidade, ou seja, quando se varia a velocidade, Re sofre uma variação equivalente. O efeito da variação do coeficiente de arrasto Ca com Re para um cilindro de seção circular é indicado de forma qualitativa na figura 1 [13], a qual também mostra a diferença entre os valores de Ca para corpos com arestas vivas e com superfícies curvas. É interessante ressaltar que em certos casos forças maiores podem resultar de velocidades menores conforme o valor de Ca . Além disso, tanto a rugosidade da superfície da barra, bem como a turbulência do escoamento incidente, causam alterações na referida curva $Ca \times Re$. Desta forma, extrapolações de dados obtidos para superfícies curvas específicas, sejam chaminés, tubos, torres ou coberturas, não são recomendadas.

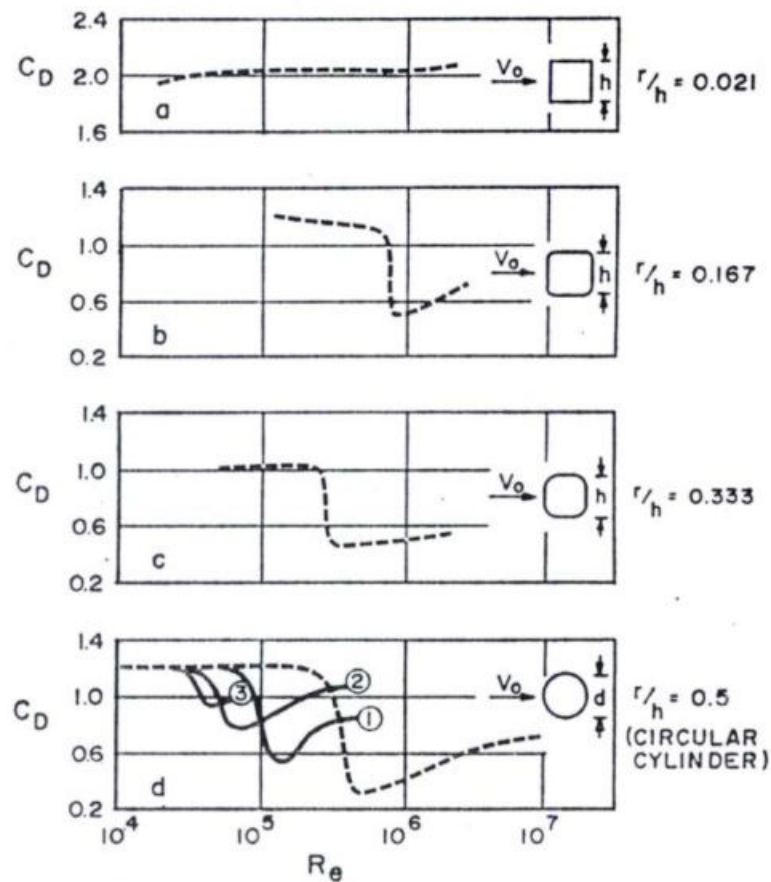
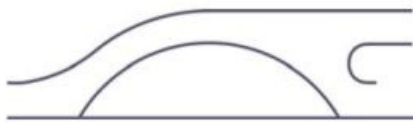


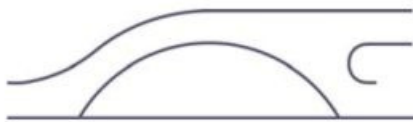
Figura 1 - Influência da variação do número de Reynolds sobre o coeficiente de arrasto de acordo com a forma da seção transversal. Os números 1, 2 e 3 na última figura representam rugosidades diferentes da superfície da seção circular e têm efeito semelhante ao de uma variação da turbulência no escoamento incidente [13].

Para utilização da segunda metodologia de cálculo descrita (b) é necessário o conhecimento dos coeficientes de força nos diversos módulos que compõe as torres, sendo este o objetivo do estudo para a *Seccional*.

Um conceito fundamental é o de índice de área exposta φ definido como a razão entre a área frontal efetiva do reticulado, A_e , e a área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado, A .

$$\varphi = \frac{A_e}{A}$$

sendo as áreas frontais as áreas de todos os membros do reticulado projetadas em um plano perpendicular à direção do vento incidente (área de sombra). O índice de área exposta tem valores entre 0 e 1, sendo que este último valor representa um corpo totalmente fechado.



As forças de arrasto nos módulos das torres são determinadas através de ensaios em túnel de vento nos quais são colocados modelos seccionais das torres e medidas as forças através de células de carga na base dos módulos. A força total obtida, F , é então dividida pela pressão dinâmica, q , e pela área efetiva de referência, A_e , sendo obtido o coeficiente de força correspondente à componente da força medida. A força total medida na direção do vento é chamada de força de arrasto, sendo o coeficiente de arrasto definido a seguir:

$$C_a = \frac{F_a}{q A_e}$$

sendo:

F_a - força de arrasto média [N];

$q = \frac{1}{2} \rho V^2$ - pressão dinâmica correspondente à velocidade média de referência [N/m^2];

ρ - massa específica do ar [kg/m^3];

V - velocidade média de referência do vento ao nível da altura média do trecho reticulado [m/s];

A_e - área efetiva de referência [m^2].

O coeficiente de arrasto é então associado com o correspondente índice de área exposta do módulo testado, tornando-se adequado para fins de codificação. O processo automaticamente inclui efeitos de proteção causados pelos elementos frontais sobre outros elementos porventura localizados em suas esteiras.

Os valores dos coeficientes de arrasto apresentados em relatórios e normas valem somente para a forma específica (configuração) da parte da torre testada e dependem diretamente do valor da área efetiva de referência utilizada no cálculo de C_a . Percebe-se que a determinação correta e criteriosa da área efetiva de referência do reticulado tem um papel determinante na recomposição do carregamento a partir dos valores de C_a disponíveis.

Os valores dos coeficientes de arrasto da norma brasileira NBR-6123 para torres atendem somente a casos especiais e não consideram a existência de membros internos em planos horizontais de contraventamento, os quais acrescentam uma parcela adicional à força de arrasto.

A figura 2 mostra, a título de exemplo, uma comparação feita por Blessmann (1990) de diversos valores de coeficientes de arrasto para uma torre reticulada de seção transversal quadrada, indicados por algumas normas e pesquisadores. Na figura 2, NBR-6123 é a norma brasileira (1988), DIN4131 uma norma alemã (1969) e NV-65 uma norma francesa (1980). Em outro trabalho, Blessmann (2001) descreve acidentes em torres treliçadas devido ao uso inadequado dos coeficientes aerodinâmicos.

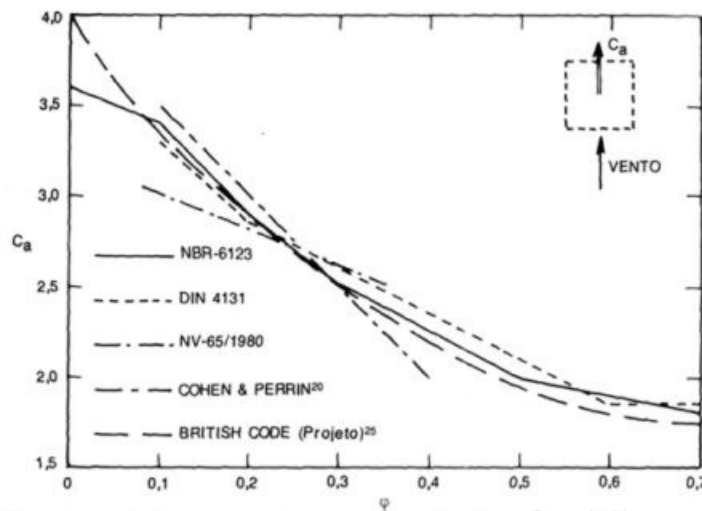
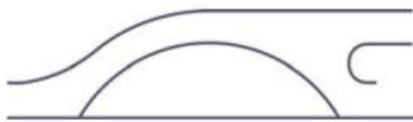


Figura 2 – Coeficiente de arrasto em torres reticuladas de seção quadrada [5].

3. Procedimento experimental

3.1 Construção dos modelos e descrição do túnel de vento

Foi construído um modelo seccional do módulo da torre *Seccional*, tendo os montantes perfis com seção transversal circular. O modelo tem escala 1:8 e foi projetado respeitando-se as condições de semelhança necessária para este tipo de estudo [14]. Fotografias do modelo ensaiado são mostradas no Anexo C.

Os ensaios foram realizados no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul [3, 4, 8], mostrado no Anexo B. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação “comprimento / altura” da câmara de ensaios superior a 10. A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, é de 42 m/s (150 km/h). A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em Engenharia Civil [9], sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade. As características do vento utilizado nos ensaios são indicadas no Anexo D.

3.2 Medição das forças de arrasto

Para a determinação da força de arrasto aerodinâmico sobre o modelo foi utilizada uma balança de força unidirecional horizontal, instalada na base do modelo e alinhada com o eixo do túnel. O desenvolvimento e a calibração desta balança estão documentados no Anexo E.

A balança é constituída de duas placas rígidas horizontais, unidas por lâminas verticais de aço inox temperado. A placa inferior é rigidamente fixada ao piso das instalações do Túnel de Vento, enquanto a placa superior é fixada à base do modelo, deslocando-se junto com este no sentido do escoamento, na proporção da força de arrasto aerodinâmico atuante. As lâminas



verticais têm sua flexibilidade criteriosamente escolhida, de forma a que o deslocamento da placa superior tenha uma magnitude adequada à sensibilidade de transdutores de deslocamento, sem contudo incorrer em não-linearidades físicas ou geométricas.

Para a medição do deslocamento relativo entre as placas rígidas da balança foram utilizados dois LVDT's marca Kyowa, condicionados e amplificados por um equipamento desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. O sinal amplificado foi monitorado por um osciloscópio digital TekTronix, modelo TDS210, de dois canais, e registrado por meio de um sistema de aquisição de dados. Este sistema de aquisição é composto por uma placa de conversão A/D de 12 bits e 16 canais, da Computerboards, modelo DAS12/330, e um *notebook* Toshiba. A placa de conversão é controlada pelo software HPVEE, versão 3.21, da Hewlett-Packard. A leitura da placa de conversão foi mapeada numa faixa de tensão de -5 a +5V, resultando em uma resolução de aproximadamente 2,4mV.

Após sua instalação na câmara de ensaios do Túnel de Vento, a balança foi estaticamente calibrada por meio de forças conhecidas. Desta forma, foi traçada uma reta de calibração relacionando diretamente a força horizontal aplicada e a tensão registrada no sistema de aquisição de dados. Esta reta de calibração está apresentada no Anexo E. Deste ajuste encontra-se uma constante de calibração igual a 31,35gf/mV, ou seja, multiplicando-se a leitura em tensão por este número conhece-se a força de arrasto atuante no modelo. Para reduzir o erro de medição foi efetuada a média entre as leituras dos dois LVDT's acoplados à balança. Considerando-se a resolução do sistema de aquisição, observa-se que o sistema de medição de uma resolução não inferior a 76gf. Esta resolução é considerada adequada para a magnitude das forças medidas (da ordem de até 12500gf).

Foram feitos registros de força de arrasto média para quatro diferentes valores de velocidade do escoamento, de forma a se verificar uma eventual influência do número de Reynolds (Re). Os ensaios foram realizados com vento incidindo entre 0° e 60°, com medidas a cada 15°. A referência para o ângulo de incidência do vento e para aplicação dos coeficientes de arrasto é indicada no Anexo F.

4. Análise dos resultados e conclusões

O relatório disponibiliza resultados correspondentes a um total de 20 ensaios, considerando-se as diferentes velocidades e ângulos de incidência do vento testados. Os resultados são mostrados no Anexo G. São fornecidos uma tabela e um gráfico compacto com os resultados dos ensaios colocados juntamente com os valores indicados pela NBR-6123. Os valores apresentados na tabela 1 correspondem à gama de variação dos coeficientes medidos para cada ângulo de incidência testado, devido à variação da velocidade do vento.

Para o cálculo dos coeficientes de arrasto a partir das forças medidas foram utilizadas duas áreas de referência, indicadas na figura 3, para ilustrar o efeito desta escolha. A força final é, obviamente, a mesma desde que seja utilizada para recomposição da força de arrasto a mesma área adotada na geração do coeficiente de arrasto. Esta especificação deve ser clara para evitar que valores incompatíveis de coeficientes de arrasto e áreas de referência sejam utilizados em conjunto para a recomposição das forças de arrasto resultantes.

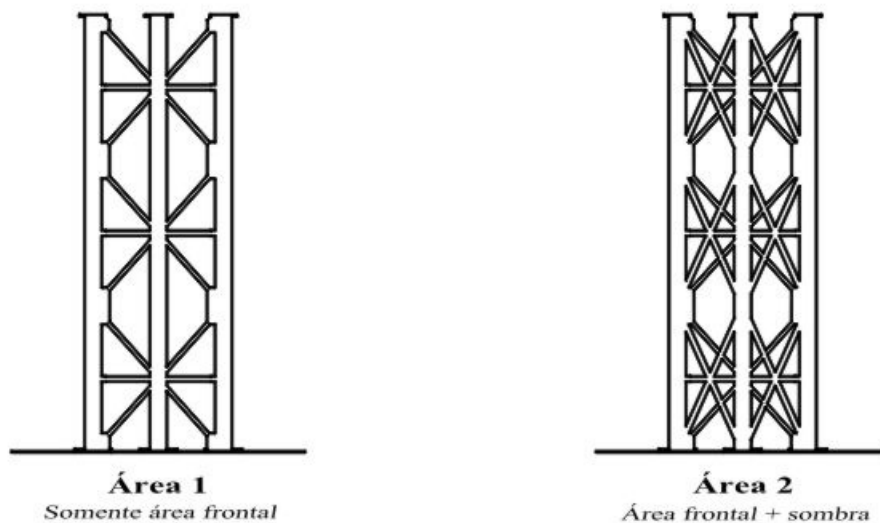
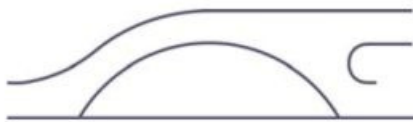


Figura 3 – Áreas de referência utilizadas no cálculo dos coeficientes de arrasto.

4.1 Coeficientes e forças de arrasto

Os valores dos coeficientes de arrasto e dos índices de área exposta correspondentes aos gráfico 2 do Anexo G, identificados na tabela 1 como C_{a2} , com as áreas de sombra sendo consideradas, representam mais fielmente o comportamento aerodinâmico dos módulos testados. **Estes valores medidos ficaram abaixo dos valores dos coeficientes aerodinâmicos para torres de secção triangular equilátera, formadas por barras de secção circular, indicados pela NBR-6123.** Para a recomposição das forças de arrasto correspondentes, a mesma área utilizada para a geração dos coeficientes deve ser utilizada.

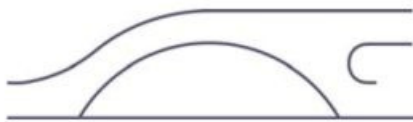
O gráfico correspondente à área 1 é mostrado para fins comparativos, devendo-se ressaltar que o índice de área exposta não contempla uma situação mais genérica. Estes valores devem ser utilizados somente para os módulos específicos para os quais foram gerados.

4.2 Constatações adicionais

Não houve variação significativa dos coeficientes aerodinâmicos com a velocidade do vento. Mesmo a introdução de um maior nível de turbulência no escoamento não foi suficiente para que houvesse efetivamente uma transição de regime. Isto indica que o comportamento aerodinâmico dos módulos é misto, com valores reduzidos dos coeficientes de arrasto em relação a uma torre com todos os membros com arestas vivas, porém sem apresentar dependência significativa do número de Reynolds.

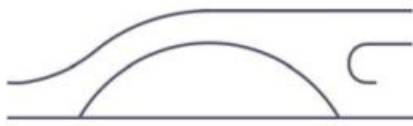
5. Agradecimentos

O estudo em túnel de vento dos perfis metálicos foi solicitado por SECCIONAL DO BRASIL S.A. O LAC agradece a atenção dispensada pelo Eng. Paulo Abreu Jr., da *Seccional*.



6. Referências bibliográficas

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- [2] Blessmann, J. (2001) Acidentes causados pelo vento. 4ed. rev. ampl. Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS. 81p. (Série Engenharia Estrutural, 2).
- [3] Blessmann, J. (1990) Aerodinâmica das Construções. 2ed. Editora Sagra. Porto Alegre.
- [4] Blessmann, J. (1982) The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10. pp. 231-248.
- [5] Blessmann, J. (1990) Tópicos de normas de vento. 2ed. Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS. 81p. (Série Engenharia Estrutural, 6).
- [6] British Code (1978) Code of Practice. Lattice Towers Loading. Third Draft.
- [7] Cohen, E. and Perrin, H. (1957) Design of multi-level guyed towers: wind loading. Proceedings of the ASCE. Journal of the Structural Division. September. No. 5.
- [8] Cook, N. J. (1990) The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures. (Building Research Establishment). London, UK.
- [9] Davenport, A. G. and Isyumov, N. (1967) 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.
- [10] Deutsches Institut für Normung (1969) An tennentragwerke aus Stahl. DIN 4131. Berlin. März.
- [11] Groupe de Coordination des Textes Techniques (1980) Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions. Règles NV.65. Paris, Ed. Eyrolles, Juin.
- [12] Loredou-Souza, A. M. (2002) Estudo da Ação do Vento sobre Treliçados Brasilsat – Fase I: Coeficientes de Arrasto para os Perfis Isolados. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico. Porto Alegre. Outubro, 2002.
- [13] Scruton, C. and Rogers, E. W. E. (1971) Steady and Unsteady Wind Loading of Building and Structures. In: *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London **A269**, 353-383.
- [14] Vickery, B. J. (1982) The aeroelastic modeling of chimneys and towers. Workshop on Wind Tunnel Modeling. Gaithersburg, Maryland, April 14-16. pp. IV-2.

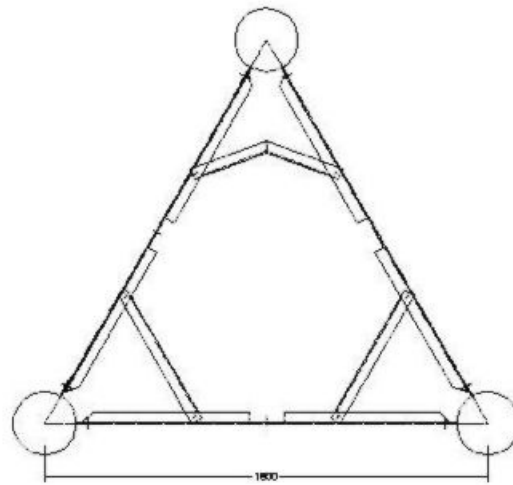


Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC

DECIV/PPGEC – UFRGS
90035-190 Porto Alegre, RS Brasil
E-mail: lac@cpgec.ufrgs.br

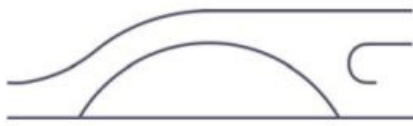
Av. Osvaldo Aranha, 99 / 305
Fone / Fax : + 55 51 3316 7146
Home Page: www.cpgec.ufrgs.br/lac

Anexo A



Módulo Seccional

Vista transversal do trecho da torre triangular



Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC

DECIV/PPGEC – UFRGS
90035-190 Porto Alegre, RS Brasil
E-mail: lac@cpgec.ufrgs.br

Av. Osvaldo Aranha, 99 / 305
Fone / Fax : + 55 51 3316 7146
Home Page: www.cpgec.ufrgs.br/lac

Anexo B



Vista do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.

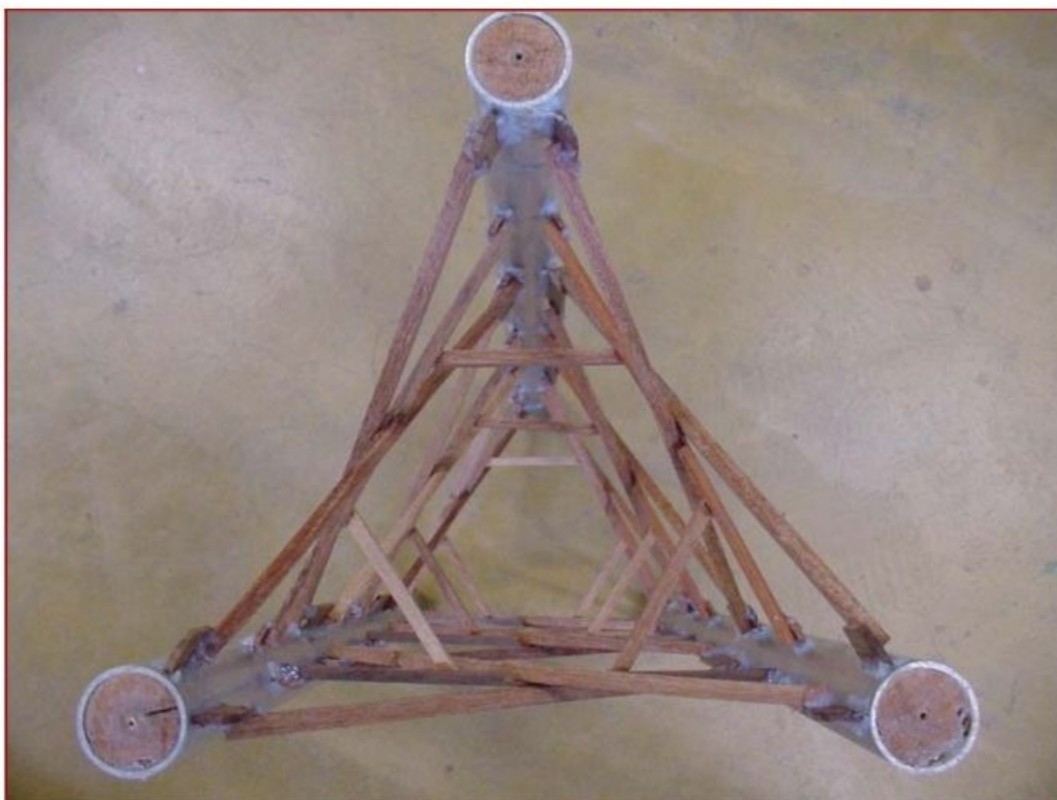


Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC

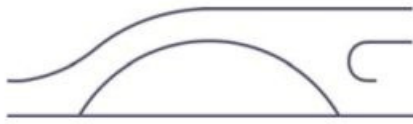
DECIV/PPGEC – UFRGS
90035-190 Porto Alegre, RS Brasil
E-mail: lac@cpgec.ufrgs.br

Av. Osvaldo Aranha, 99 / 305
Fone / Fax : + 55 51 3316 7146
Home Page: www.cpgec.ufrgs.br/lac

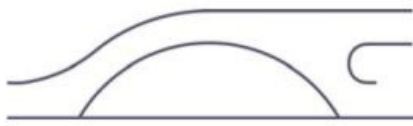
Anexo C



Fotografias do modelo seccional reduzido da torre de secção triangular *Seccional Brasil*.



Fotografias do modelo seccional reduzido da torre de secção triangular *Seccional Brasil* no interior do túnel de vento.

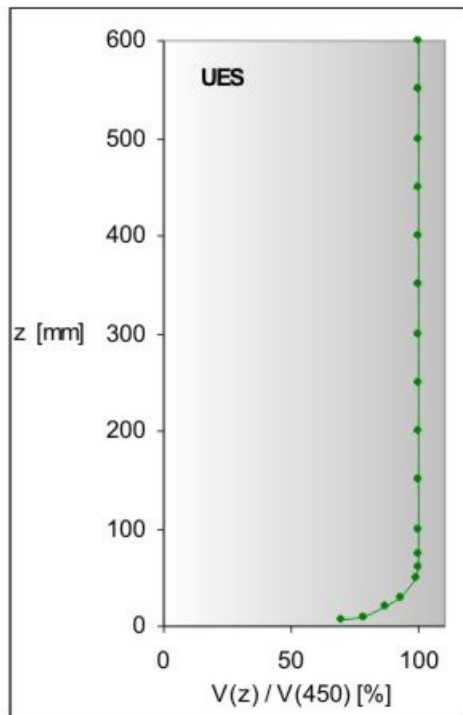
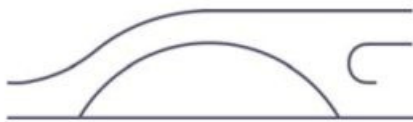


Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC

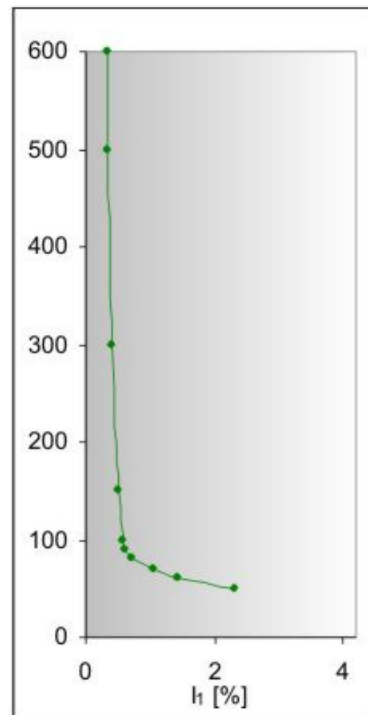
DECIV/PPGEC – UFRGS
90035-190 Porto Alegre, RS Brasil
E-mail: lac@cpgec.ufrgs.br

Av. Osvaldo Aranha, 99 / 305
Fone / Fax : + 55 51 3316 7146
Home Page: www.cpgec.ufrgs.br/lac

Anexo D

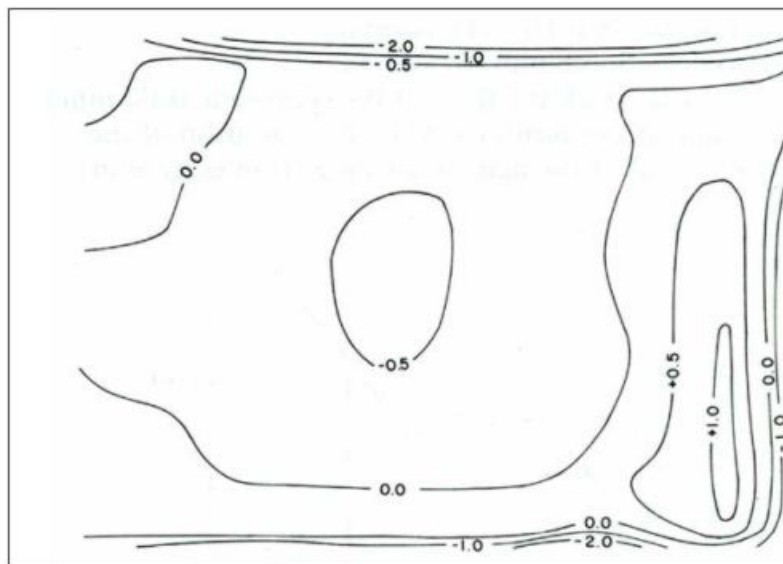


Perfil de velocidades médias



Perfil da intensidade da componente longitudinal da turbulência

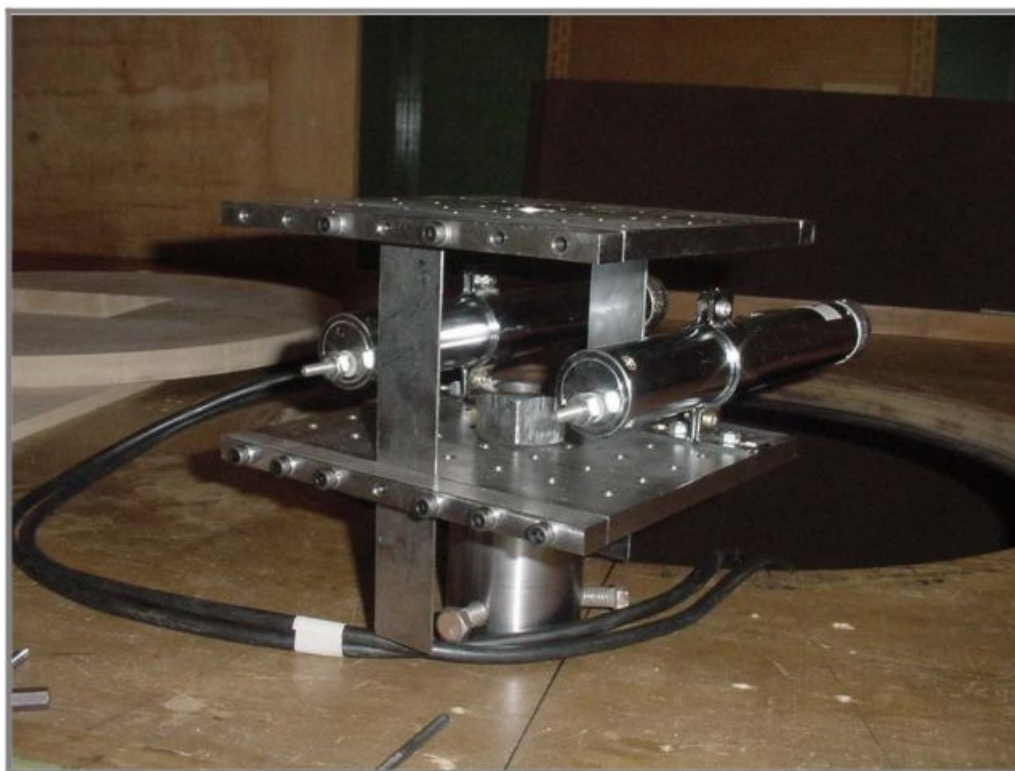
Características do vento nos ensaios dos módulos das torres.



Uniformidade da seção transversal do túnel em termos do desvio percentual da velocidade média obtida na região interna da seção de ensaios do túnel de vento, com a exclusão da camada limite.



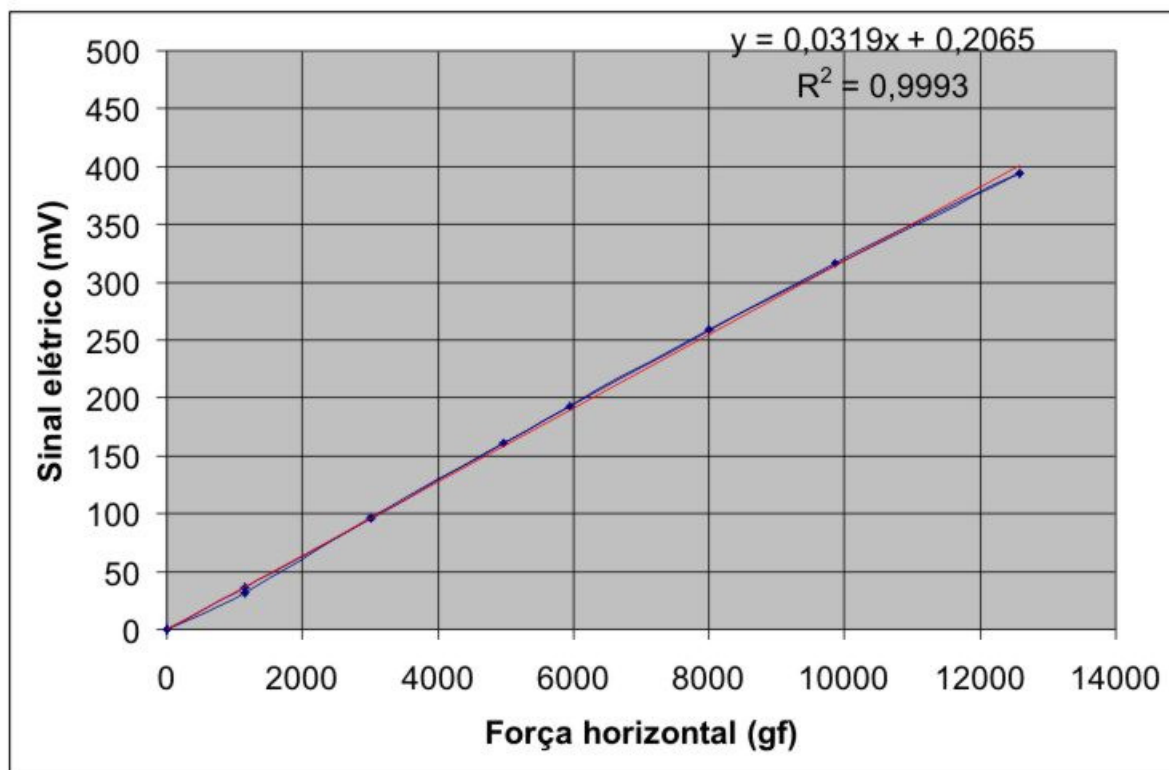
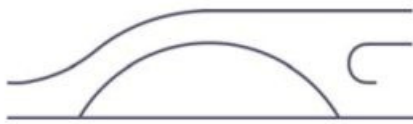
Anexo E



Balança de força unidirecional, instrumentada com LVDT's.



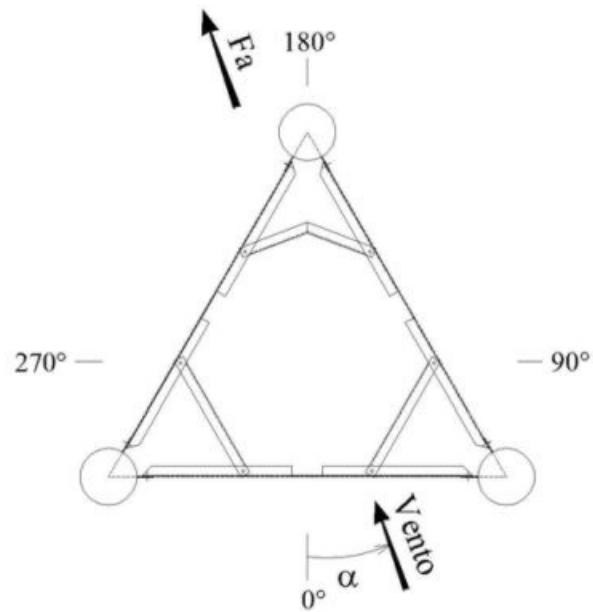
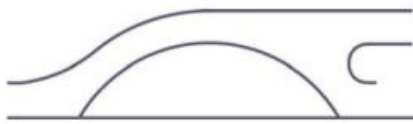
Sistema de condicionamento, monitoramento, e registro de sinais.



Ajuste de função linear aos pontos de calibração da balança de força unidirecional horizontal.



Anexo F



**Referência para o ângulo de incidência do vento
e para aplicação dos coeficientes de arrasto**