

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TELAS POROSAS SOBRE A
AERODINÂMICA DE PILHAS DE CARVÃO**

Karin Ceroni Malcum

Porto Alegre
Dezembro de 2006

KARIN CERONI MALCUM

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TELAS POROSAS SOBRE A
AERODINÂMICA DE PILHAS DE CARVÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre
Dezembro de 2006

K243a Malcum, Karin Ceroni
Avaliação dos efeitos de telas porosas sobre a aerodinâmica de pilhas de carvão / Karin Ceroni Malcum. – 2006.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2006.

Orientação: Prof. Dr. Acir Mércio Loredo-Souza
Prof.^a Dr.^a Edith Beatriz Camaño Schettini

1. Túnel de vento. 2. Telas porosas. 3. Carvão. 4. Vento.
I. Loredo- Souza, Acir Mércio, orient. II. Camaño Schettini, Edith Beatriz, orient. III. Título.

CDU-624.042.4(043)

KARIN CERONI MALCUM

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TELAS POROSAS SOBRE A
AERODINÂMICA DE PILHAS DE CARVÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de dezembro de 2006.

Prof. Acir Mércio Loredo Souza
Ph.D, University of Western Ontario, Canadá
Orientador

Prof. Edith Beatriz Camaño Schettini
Dr., *Institut Polytechnique de Grenoble*, França
Orientadora

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mário José Paluch (UPF)
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Adrián Roberto Wittwer (UNNE)
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Emílio de Sá Brito de Almeida (UFRGS)
Dr., *Universite de Paris XI (Paris-Sud)*, França

Aos meus pais, Antonio e Scheyla,
pois sem seu amor e dedicação nenhuma das
minhas conquistas teriam sido alcançadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Acir Mércio Loredou-Souza e Edith Beatriz Camaño Schettini, orientadores deste trabalho, pela dedicação, paciência e amizade durante o período de desenvolvimento das atividades.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Elvis Antônio Carpeggiani, Fabrício De Paoli, Gustavo Javier Zani Núñez, Josué Argenta Chies, Leandro Inácio Rippel, Maria Cristina Dolz Bênia, Miguel Chaves Custódio e Paulo Francisco Bueno, pela amizade, apoio e contribuição na realização dos ensaios.

Agradeço aos colegas de mestrado do PPGEC, tanto do Meio Ambiente quanto de Estruturas, em especial a Daniel Alexandre Nunes, Fabrício De Paoli, Juliana Ana Chiarello e Ariela da Silva Torres pelo companheirismo, amizade e cooperação enquanto estávamos no mesmo barco.

Agradeço à minha família pela franca compreensão durante os meus períodos de ausência...

Agradeço aos meus verdadeiros amigos por entenderem quando eu não podia estar presente. E por não terem se magoado com as freqüentes recusas nesse período aos convites para as festas e happy-hours.

Agradeço ao Fabrício por ter me acompanhado em minha trajetória desde a graduação, por me estimular, por estar sempre ao meu lado, nos bons e maus momentos. Agradeço o companheirismo e todas as vezes que me deu o ombro, nos momentos mais angustiantes desta jornada. Agradeço por fazer parte da minha vida e por dividir comigo a alegria deste momento.

À Companhia Vale do Rio Doce pela oportunidade de estudo e pela autorização de divulgação dos resultados.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio financeiro durante a execução deste trabalho.

Agradeço também a todos aqueles que acreditam em nós, mesmo quando parecemos ousados em nossas buscas...

*Às vezes ouço passar o vento;
e só de ouvir o vento passar,
vale a pena ter nascido.*

Fernando Pessoa

SUMÁRIO

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Resumo	xvii
<i>Abstract</i>	xviii
1 Introdução	01
1.1 Considerações iniciais	01
1.2 A questão do uso do carvão	03
1.3 A problemática ambiental	05
1.4 Caracterização do problema: vento em pilhas de carvão	08
1.5 Objetivos do trabalho	10
1.6 Estrutura da Dissertação	10
2 Caracterização do fenômeno e revisão bibliográfica	11
2.1 Caracterização do fenômeno	11
2.2 Os mecanismos de transporte das partículas	12
2.3 Mecanismos de proteção	18
2.3.1 A aerodinâmica do quebra-vento	18
2.3.2 Proteção de pilhas de carvão	21
3 Ensaio em túnel de vento	25
3.1 O programa experimental	25
3.2 O Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann	39
3.3 Características do vento simulado	41
3.4 Medição das pressões na superfície da pilha	44
3.4.1 Considerações gerais	44
3.4.2 Coeficientes aerodinâmicos	45
3.5 Medição das velocidades do vento	48
3.6 Visualização do escoamento	50

4 Resultados	51
4.1 Análise dos resultados referentes às velocidades	51
4.1.1 Perfis verticais de velocidades	51
4.1.2 Velocidades tangenciais	56
4.2 Análise dos resultados referentes às pressões	59
4.3 Visualização do escoamento	69
5 Conclusões e sugestões	71
5.1 Conclusões	71
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	72
6 Referências	74
6.1 Referências consultadas	74
6.1 Referências adicionais	77
Anexo A	78
Anexo B	86

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 – Visão de um pátio de armazenamento de carvão.	02
Figura 1.2 – Reservas mundiais de carvão no ano de 2002.	04
Figura 1.3 – Gráfico comparativo entre os anos de 1995 e 2005 do panorama de produção e consumo mundial de carvão.	05
Figura 1.4 – Processo de erosão de uma pilha de material estéril.	08

Capítulo 2

Figura 2.1 – Balanço de forças em um grão isolado.	14
Figura 2.2 – Balanço de forças em um grão inserido em uma pilha.	15
Figura 2.3 – Mecanismos de movimento de um grão.	17
Figura 2.4 – Trajetórias de uma partícula em saltação e em suspensão.	18
Figura 2.5 – Linhas de corrente de um escoamento com barreira sólida.	19
Figura 2.6 – Linhas de corrente de um escoamento com barreira porosa.	19
Figura 2.7 – Diferentes configurações da extremidade da tela.	22
Figura 2.8 – Telas instaladas em POSCO, Coréia do Sul.	23
Figura 2.9 – Telas instaladas em POSCO, Coréia do Sul.	24

Capítulo 3

Figura 3.1 – Características geométricas da pilha padrão estudada.	25
Figura 3.2 – Localização das tomadas de pressão na pilha projetada.	26
Figura 3.3 – Modelo da pilha de carvão.	26
Figura 3.4 – Ensaio do modelo com tela a barlavento (configuração AB MSX).	28
Figura 3.5 – Ensaio do modelo com tela a sotavento (configuração EF MSX).	29
Figura 3.6 – Ensaio do modelo com telas a barlavento e a sotavento (configuração AB LRX + EF LSX).	29
Figura 3.7 – Configurações dos ensaios com uma tela a barlavento.	30
Figura 3.8 – Configurações dos ensaios com uma tela a sotavento.	31
Figura 3.9 – Configurações dos ensaios com duas telas (a barlavento e sotavento).	32
Figura 3.10 – Configurações dos ensaios com uma tela a barlavento.	33

Figura 3.11 – Configurações dos ensaios com uma tela a sotavento e com duas telas (a barlavento e a sotavento).	34
Figura 3.12 – Imagem das malhas utilizadas na confecção das telas.	35
Figura 3.13 – Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann.	40
Figura 3.14 – Desenho esquemático da vista superior do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.	40
Figura 3.15 – Características do vento simulado (expoente $p = 0,23$).	42
Figura 3.16 – Vista interna do túnel de vento mostrando os elementos simuladores.	43
Figura 3.17 – Sistema de medição de pressões com transdutores elétricos.	46
Figura 3.18 – Fotografia de um ensaio típico com multimanômetro.	46
Figura 3.19 – Esquema de um manômetro tipo Betz.	48
Figura 3.20 – Sistema de medição de velocidades instantâneas.	49
Figura 3.21 – Esquema de funcionamento de um anemômetro de fio-quente	50

Capítulo 4

Figura 4.1 – Localização dos perfis verticais de velocidades (dimensões em cm).	51
Figura 4.2 – Resultados dos perfis 1 a 3.	52
Figura 4.3 – Resultados dos perfis 4 a 6.	53
Figura 4.4 – Resultados dos perfis 8 e 9.	54
Figura 4.5 – Posicionamento dos pontos de medição na face a barlavento da pilha (dimensões em cm).	56
Figura 4.6 – Coeficientes de velocidades médias (C_v).	58
Figura 4.7 – Coeficientes dos valores <i>rms</i> das flutuações de velocidade (C'_v).	58
Figura 4.8 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 0°).	61
Figura 4.9 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 30°).	62
Figura 4.10 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 120°)	63
Figura 4.11 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (EF OSX 120°)	63
Figura 4.12 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 90°).	65
Figura 4.13 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (EF MRX 90°).	65
Figura 4.14 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 60°).	66
Figura 4.15 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (EF LSY 60°).	66
Figura 4.16 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (AB ORY EF OSY 90°).	67
Figura 4.17 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (AB MSX EF MRX 90°).	68
Figura 4.18 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (AB LRY EF LRY 90°).	68
Figura 4.19 – Visualização do escoamento com fumaça.	69

Figura 4.20 – Visualização do escoamento com fumaça.	69
Figura 4.21 – Visualização do escoamento com haste flexível.	70
Figura 4.22 – Visualização do escoamento com haste flexível.	70
Figura 4.23 – Visualização do escoamento com haste flexível.	70

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1 – Percentuais médios aproximados da composição nos diversos <i>ranks</i> do carbono.	03
---	----

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Coordenadas da projeção das tomadas de pressão na superfície externa do modelo.	27
Tabela 3.2 – Caracterização das malhas utilizadas na confecção das telas.	31
Tabela 3.3 – Configurações utilizadas nos ensaios com uma tela a barlavento (posição AB).	36
Tabela 3.4 – Configurações utilizadas nos ensaios com uma tela a barlavento (posição CD).	37
Tabela 3.5 – Configurações utilizadas nos ensaios com duas telas (a sotavento e a barlavento).	38
Tabela 3.6 – Configurações utilizadas nos ensaios com uma tela a sotavento (posição EF).	39

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Coeficientes de velocidades médias (C_v).	57
Tabela 4.2 – Coeficientes dos valores <i>rms</i> das flutuações de velocidade (C'_v).	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

\widehat{AB}	Intervalo entre os pontos A e B
\vec{F}_A	Força de atrito
\vec{F}_D	Força de arrasto
\vec{F}_L	Força de sustentação
\vec{g}	Força de aceleração da gravidade
\vec{n}	Vetor normal ao plano de contato entre grãos
\vec{P}	Força peso
\vec{P}_A	Força de contato no ponto A do grão com seu grão adjacente
\vec{P}_B	Força de contato no ponto B do grão com seu grão adjacente
\vec{R}	Vetor resultante
A	Ponto de contato entre dois grãos contíguos
B	Ponto de contato entre dois grãos contíguos
c_a	Coefficiente de arrasto
c_p	Coefficiente de pressão
\bar{c}_p	Coefficiente de pressão médio
C_v	Coefficiente de velocidade média
C'_v	Coefficiente dos valores <i>rms</i> das flutuações de velocidade
D	Diâmetro do grão
f	Coefficiente de atrito dos grãos
f	Parâmetro adimensional de Gandemer (1979)
F	Força
f_G e f'_G	Funções de relação entre parâmetros do grão
G	Propriedade genérica do grão
g_1, g_2, \dots, g_n	Parâmetros dos grãos
h	Altura da tela, barreira ou quebra-vento
H	Altura da pilha
I	Intensidade da turbulência

I_l	Intensidade do componente longitudinal da turbulência
k_0	Coefficiente do túnel de vento que vincula q e Δp_A
L	Dimensão característica, comprimento
L_l	Macroescala do componente longitudinal da turbulência
L	Macroescala da turbulência
m	Massa da partícula
p	Pressão atmosférica no momento do ensaio
$p(t)$	Pressão instantânea em um tempo t
\bar{p}	Valor médio de $p(t)$ em um intervalo de tempo de amostragem T
p	Expoente da curva de potência teórica ajustada ao perfil de velocidades médias (neste trabalho, $p = 0,23$)
p_0	Pressão atmosférica padrão, igual a 760mmHg
p_0	Pressão de pico
p_1, p_2	Pressões medidas no manômetro tipo Betz
q	Pressão dinâmica ao longe
$q = \frac{1}{2} \rho U^2$	Pressão dinâmica de referência
\tilde{q}	Pressão dinâmica de pico
Re	Número de Reynolds
s	Reta suporte da força de sustentação
s'	Reta paralela a s que contém o ponto final de \vec{P}
T_b	Trajatória de uma partícula
T_s	Trajatória aleatória de uma partícula
T_k	Temperatura em kelvin
t	Tempo
T	Intervalo de tempo de amostragem
u_1, u_2, \dots, u_i	Módulo da velocidade do escoamento em uma determinada direção
V	Velocidade do vento
\bar{U}	Velocidade média de vento na direção paralela à superfície da pilha
U_{ref}	Velocidade média de referência no topo da pilha

$U(z)$	Velocidade instantânea do vento
$\bar{U}(z)$	Velocidade média temporal
$u(z)$	Flutuação de velocidade
$u'(z)$	Valor <i>rms</i> da flutuação de velocidade média do vento na direção paralela à superfície da pilha
$\bar{V}(z)$	Velocidade média do vento na altura z
\bar{V}_{ref}	Velocidade média do vento em uma altura de referência $x_{ref}=450mm$ dentro do túnel (equivalente à cota longitudinal do túnel)
z	Altura a partir do terreno
z	Cota acima do nível de referência (piso do túnel de vento)
z_0	Rugosidade do terreno
z_i	Altura da camada i
z_{ref}	Cota do eixo longitudinal do túnel = 450mm

Letras Gregas

α	Ângulo formado entre o plano horizontal e a reta suporte s
ε	Porosidade ou permeabilidade da tela
Δp_A	Diferença de pressão entre anéis piezométricos no convergente do túnel de vento
γ_s	Peso específico do grão
μ	Viscosidade cinemática
θ	Ângulo formado entre o plano horizontal e a superfície inclinada da pilha
ρ	Massa específica
ρ_s	Massa específica do grão
Ψ	Ângulo de atrito entre os grãos
$(\tau_0)'_{cr}$	Tensão limite de cisalhamento atuante no grão
$(\tau_0)_{cr}$	Tensão crítica de cisalhamento atuante no grão
τ_0	Tensão de cisalhamento atuante no grão

RESUMO

MALCUM, K. C. **Avaliação dos efeitos de telas porosas sobre a aerodinâmica de pilhas de carvão.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O manuseio de matéria-prima bruta utilizada na indústria pode gerar emissões durante o seu transporte, armazenamento e eventual mistura. A atuação dos ventos em pátios abertos de armazenamento de carvão que existem em termelétricas, siderúrgicas e zonas de mineração pode acarretar no transporte e dispersão de partículas de carvão a grandes distâncias e a alturas consideráveis. É desejável reduzir a emissão do poluente sem interferir na atividade operacional destes pátios de carvão, de forma a se obter ganhos ambientais e econômicos. Os efeitos da utilização de telas de proteção para reduzir o transporte eólico de partículas de carvão foram estudados através de ensaios em túnel de vento, medindo-se as distribuições das pressões médias e flutuantes sobre a superfície de um modelo reduzido, em escala 1/125, de uma pilha representativa de um pátio real de estocagem de carvão. Distintas porosidades de tela (68%, 53%, 37% e 0%), em três distintas configurações, dois afastamentos e a duas diferentes alturas foram testadas. Além das medidas de pressões, o campo de velocidades sobre a superfície e entorno das pilhas foi obtido através de medições com sistema de anemometria de fio quente. Percebe-se claramente que as velocidades médias do vento são mais altas próximo ao topo da pilha, e que a presença das telas causa uma redução destas velocidades nas regiões mais críticas. As telas com porosidades intermediárias mostraram-se mais eficazes em minorar os efeitos nocivos provocados pela combinação das sucções na superfície com as velocidades tangenciais de arrasto. Verificou-se que a redução da porosidade implica em uma redução na velocidade do vento atuante na pilha. Quando posicionada a barlavento, a tela com porosidade 0% (placa) causou um aumento da zona de recirculação atrás da mesma, aumentando, portanto, as sucções sobre a superfície da pilha. Entretanto, quando posicionada a sotavento, a placa sólida implicou em reduções significativas das pressões médias sobre a pilha. De uma forma geral, as telas com porosidades variando de 53% a 68% foram mais eficazes em reduzir as flutuações de pressão na face a barlavento da pilha, sem aumentar significativamente as pressões médias. Entretanto, as telas com porosidade em torno de 37% foram as mais eficientes em reduzir os picos de pressão que se desenvolvem a partir de incidências oblíquas do vento.

Palavras-chave: Vento, Carvão, Erosão Eólica, Telas Porosas, Túnel de Vento.

ABSTRACT

MALCUM, K. C. **The effects of porous fences on the aerodynamics of coal piles.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The effects of using wind fences to reduce wind-blown coal dust were studied through wind tunnel tests. The mean and fluctuating pressure distributions over the surface of reduced coal pile models were measured. The tests were performed at a 1/125 scaled model of a typical coal pile. Different fence porosities (68%, 53%, 37%, 0%) as well as different fence positions and heights were tested. Further to the pressure measurements, the field velocities over the surface and surroundings of the piles were obtained through hot-wire anemometry measurements. The fence with no porosity (0%) caused an increase in the re-circulating zone behind the fence, therefore increasing the negative pressures over the pile surface, being soon disregarded. The fences with porosities ranging from 53% to 68% were most effective in reducing the pressure fluctuations on the windward face of the pile, without increasing significantly the mean pressures over it. These pressures are closely related to the dust emissions from the surface, directly affecting the surrounding environment. Although most effective for reducing pressure fluctuations, the best combined effect together with the drag surface velocities were found for the fences with intermediate porosities. The 37% porosity fence was the most effective in reducing the oblique wind induced peak pressures.

Key Words: Wind; Coal; Erosion; Aeolian Transportation; Wind Fences; Wind Tunnel.

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A qualidade do ar no nosso planeta tem passado por várias mudanças ao longo da história. Atividades antropogênicas, desenvolvidas especialmente desde o século XIV, quando o carvão começou a substituir a madeira como fonte principal de energia, claramente perturbaram o ecossistema terrestre.

Segundo Parker (1978), já em meados do ano de 1257, a Rainha Eleonor do Reino Unido, esposa de Henry III, trocou a cidade de Nottingham por Tutbury devido à fumaça presente no ar. O *Committee on Air Pollution* do Reino Unido fez, em 1953, estimativas de custos dos danos causados pela poluição atmosférica em algumas cidades do Reino Unido, que somados chegariam a 250 milhões de libras anuais.

O manuseio de matéria-prima bruta utilizada na indústria pode gerar emissões durante o seu transporte, armazenamento e eventual mistura. A intensidade que ocorrem as emissões é influenciada, entre outras coisas, pelo uso de proteções, pelo grau de exposição à atmosfera e pela utilização de aspersores de água ou outras substâncias. A utilização da aspersão de água sobre o material é um recurso bastante empregado atualmente. Segundo a *United States Environmental Protection Agency* (2001), embora a sua utilização possa ser benéfica em alguns materiais como minérios secos, em outros materiais pode não ser tão eficiente.

O fenômeno de erosão de partículas na superfície do solo que ocorre frequentemente em pátios abertos de armazenamento de carvão de termelétricas, siderúrgicas e zonas de mineração pode causar sérios problemas ambientais, além da própria perda de material, resultando em desperdício desnecessário de investimento da empresa. A atuação de ventos fortes pode acarretar no transporte e dispersão dessas partículas de carvão a grandes distâncias e a alturas consideráveis. A figura 1.1 mostra a imagem de um pátio de armazenamento de carvão em Vitória, Espírito Santo, submetido à erosão eólica.

Barreiras de proteção naturais ou artificiais têm sido muito utilizadas com finalidades e aplicações diversas, e hoje em dia estão sendo adotadas adicionalmente à aspersão de líquidos nas pilhas para o controle da dispersão para a atmosfera de material particulado

proveniente da indústria, como é o caso do pó de carvão presente em empresas mineradoras e siderúrgicas.



Figura 1.1 – Visão de um pátio de armazenamento de carvão.

É desejável reduzir a emissão das pilhas de carvão sem interferir na atividade operacional dos pátios de estocagem, de forma a se obter ganhos ambientais e econômicos. De forma prática, deve-se tentar conciliar da melhor forma possível o posicionamento e a configuração dessas barreiras nos pátios de armazenamento, minimizando essas emissões indesejadas.

Entretanto, o mecanismo de erosão eólica é de difícil entendimento, uma vez que o fenômeno de dispersão é complicado e depende de muitos fatores como materiais envolvidos, topografia e condições meteorológicas do local. Por sua complexidade, esse fenômeno é de difícil modelagem numérica e não estão disponíveis muitas relações empíricas para a modelagem da erosão de material particulado.

A exploração de qualquer recurso natural do planeta consiste em uma atividade potencialmente poluidora. Nos últimos anos, a opinião pública e a sociedade têm se sensibilizado com as demandas ambientais, cobrando, embora ainda de forma incipiente, uma nova visão por parte da indústria e dos governantes com relação às questões ambientais.

1.2 A questão do uso do carvão

Milhões de toneladas de carvão são, hoje em dia, extraídas e utilizadas para usos que vão desde a simples queima do carvão para geração de energia até a fabricação de coque metalúrgico empregado em alto-fornos para a produção de aço.

O carvão é uma rocha sedimentar combustível, constituída de material vegetal heterogêneo depositado em ambiente úmido, soterrado e compactado em bacias originalmente pouco profundas. Neste ambiente, protegido da ação do oxigênio, os restos vegetais sofrem um processo de decomposição pela ação de bactérias anaeróbias, sob ação da pressão das camadas sobrepostas e do calor (de origem geotérmica e de intrusões ígneas) ao longo de milhões de anos (GUERRA, 2000).

Segundo Abreu (1973) *apud* Guerra (2000), o carvão possui teores de carbono, hidrogênio e oxigênio variáveis de acordo com os diversos estágios de transformação dos restos vegetais. Durante o processo de carbonificação ocorre gradualmente um aumento do teor de carbono e uma diminuição dos teores de oxigênio e hidrogênio. Nesse processo de transformação, a celulose passa por diversas etapas (denominadas *rank* ou grau de evolução), que são usualmente nomeadas turfa, linhito, hulha, antracito e grafite. Quanto maior o *rank* de um carvão, maior será o percentual de carbono na sua composição. A tabela 1.1 apresenta a composição média de carbono de cada etapa do processo.

Tabela 1.1 – Percentuais médios aproximados da composição nos diversos *ranks* do carbono.
Fonte: Guerra (2000).

<i>Rank</i>	Teor de Carbono [%]
Celulose	45
Turfa	55 a 60
Linhito	65 a 75
Hulha	75 a 85
Antracito	»95
Grafite	»100

Segundo dados de Scott (1994) *apud* Krell (2000), o consumo médio mundial de carvão para uso siderúrgico ultrapassa 500 milhões de toneladas por ano, sendo menor apenas que o consumo para geração de energia elétrica. Embora menos de 15% das reservas mundiais tenham as propriedades necessárias para a coqueificação, o principal uso do carvão na indústria siderúrgica é a produção de coque para uso em alto-forno. No Brasil, o

maior consumo de carvão também ocorre na produção de coque de alto-forno, sendo que atualmente a totalidade do carvão utilizado para esta finalidade é importada.

Neves e Chaves (2000) estimam que as reservas de carvão brasileiras sejam da ordem de 32,3 milhões de toneladas de carvão, sendo que a maior parte dessas reservas está localizada no sul do país, principalmente no estado do Rio Grande do Sul. A figura 1.2 indica, em milhões de toneladas, as reservas mundiais de carvão no ano de 2002. Verifica-se que as reservas de carvão estão bem distribuídas na Ásia (com exceção do Oriente Médio), na América do Norte (com exceção da Groenlândia) e na Oceania. Na Europa, estão concentradas no Leste Europeu, na Alemanha e no Reino Unido. A África e a América Central são escassas desse recurso, sendo que as poucas reservas existentes estão concentradas na África do Sul. O Brasil concentra, juntamente com a Colômbia, grande parte das reservas sul-americanas.

A figura 1.3 mostra o comparativo entre os anos de 1995 e 2005 do panorama de produção e consumo mundial de carvão. Segundo dados da BP, o mercado de carvão praticamente dobrou nos últimos 10 anos, impulsionado pelos Estados Unidos e pela China, que é atualmente o maior país consumidor de carvão, contribuindo com 80% do crescimento da demanda mundial.



Figura 1.2 – Reservas mundiais de carvão no ano de 2002.

Fonte: BRASIL - ANEEL (2005).

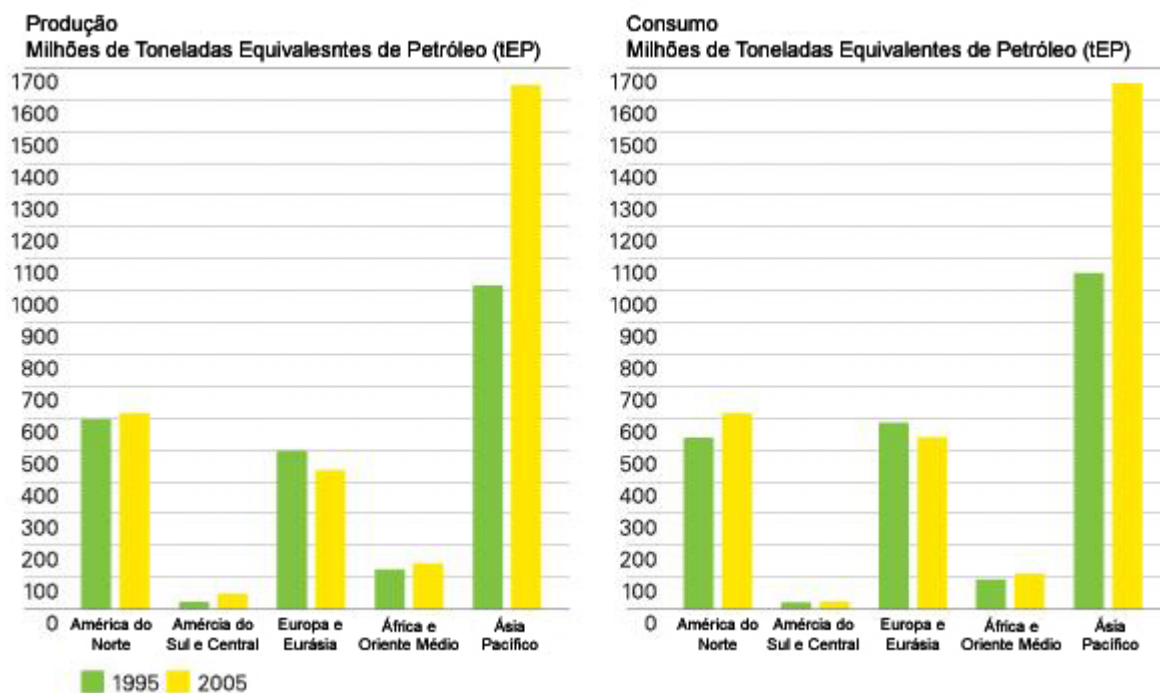


Figura 1.3 – Gráfico comparativo entre os anos de 1995 e 2005 do panorama de produção e consumo mundial de carvão. Fonte: Adaptado de BP (2006).

1.3 A problemática ambiental

Poluentes atmosféricos podem ser encontrados na natureza na forma de gases, como o monóxido de carbono (CO) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), ou na forma de material particulado, que são substâncias líquidas ou sólidas de tamanho microscópico ou submicroscópico, entretanto com dimensões maiores que as dimensões moleculares. O material particulado pode ser classificado de acordo com o tamanho de suas partículas, que variam desde diâmetros menores que 0,1 μm até diâmetros maiores que 2,5 μm (Zanetti, 1990). A origem desse material pode ser natural (como a erosão do solo, erupções vulcânicas e incêndios em áreas florestais), industrial (como o pó de insumos industriais como o carvão) ou automotiva (como as emissões veiculares).

Para Frank (1989) *apud* Guerra (2000), o conhecimento da atmosfera é fator importante nos estudos de poluição atmosférica, tanto pela sua condição de receptora das emissões como por sua condição de agente sobre os meios físico, biológico e social. Como corpo receptor, promove a dispersão de poluentes de diversas fontes, que podem atingir

áreas muito distantes do local de emissão. Como agente, o clima condiciona os processos que agem sobre o meio físico, interagindo com as ações antropogênicas.

Quando lançados na atmosfera, estes poluentes freqüentemente geram condições insalubres da qualidade do ar e, algumas vezes, concentrações em níveis letais. Além disso, sabe-se que os poluentes atmosféricos podem causar efeitos perniciosos a longo prazo, de difícil previsão.

Para Williamson (1973) *apud* Zanetti (1990) qualquer substância adicionada ao ambiente pode ser definida como contaminante quando causar uma modificação da composição geoquímica média do ambiente. Os poluentes, por sua vez, são substâncias às quais se associam efeitos negativos no meio-ambiente. O limiar que diferencia um de outro é muito tênue, uma vez que esta classificação está baseada no conhecimento dos efeitos deletérios de uma substância pelo homem, conhecimento este que se aprofunda com o passar do tempo e com o avanço da pesquisa científica. A indústria farmacêutica possui vários exemplos de substâncias que em determinado momento da história eram consideradas seguras para o uso humano, e que com o passar do tempo mostraram-se não ser tão inofensivas.

Os efeitos adversos de contaminantes e poluentes atmosféricos podem incluir liberação de odores no meio-ambiente, disfunções do sistema respiratório (como bronquite, enfisema pulmonar, reações alérgicas e câncer de pulmão), efeitos mutagênicos e cancerígenos no ser humano, danos a obras de arte e edificações nas cidades (como abrasão, deposição, ataque químico e corrosão eletroquímica), danos ecológicos em geral e mudanças meteorológicas.

Na vizinhança de cidades e zonas industriais, as partículas em suspensão no ar podem inclusive afetar o processo de fotossíntese das plantas, em função da redução da intensidade e qualidade da luz, além de causar irritação nas vias respiratórias de animais. Metais pesados e outros elementos traços podem ser ingeridos por animais quando essas partículas se depositam nas superfícies expostas das plantas usadas como alimentação (Parker, 1978).

Problemas ocupacionais podem surgir quando trabalhadores ficam expostos a ambientes contaminados. A população pode ser prejudicada quando aglomerados

residenciais estiverem situados dentro da região afetada. Além disso, o leito de cursos d'água podem ser colmatados, causando danos ao ecossistema aquático.

No Brasil, em 1989, o Conselho Nacional do Meio Ambiente instituiu, através da Resolução 005/1989, o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). O Programa tem a função de proteger a saúde e o bem-estar da população brasileira e melhorar a sua qualidade de vida, servindo como instrumento básico de gestão ambiental. O objetivo da Resolução é permitir de forma ambientalmente segura, o desenvolvimento econômico-social do país, limitando a nível nacional a emissão de poluentes atmosféricos (BRASIL, CONAMA, 1989b).

Introduz-se na legislação brasileira, com esta resolução, o conceito de padrões de qualidade do ar, até então inexistentes. Os padrões primários são aquelas concentrações de poluentes que, uma vez ultrapassadas, podem implicar em danos à saúde da população. Definem, portanto, os níveis máximos toleráveis de concentração dos poluentes. Os padrões secundários, por sua vez, caracterizam concentrações tais que abaixo delas prevê-se um mínimo efeito adverso sobre a população, à fauna, flora, materiais e meio-ambiente em geral. Definem, dessa maneira, os níveis máximos desejados de concentração de poluentes (BRASIL, CONAMA, 1989b).

No ano seguinte foi publicada a Resolução número 003/1990 que define como poluente atmosférico “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora e prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.” (BRASIL, CONAMA, 1990c).

A utilização do carvão para geração de energia é uma atividade altamente impactante, uma vez que gera quantidades significativas de resíduos (cinzas e rejeitos), ocasionando entre outras coisas, acidificação e assoreamento dos recursos hídricos e alterações da geomorfologia local.

O processo de mineração do carvão a céu aberto implica em lançar, no meio ambiente, águas derivadas da drenagem das minas com baixo pH e altas concentrações de hidróxidos e óxidos de ferro, manganês e outros metais, devidos ao processo de

decomposição da pirita do carvão quando colocada em contato com a água e com o ar (SCHEIBE, 2002).

O transporte ferroviário do carvão também pode ser capaz de produzir impacto ambiental em áreas residenciais e agrícolas, particularmente aquelas que estejam próximas ou sejam atravessadas pela ferrovia. Estudos de Ferreira e Vaz (2004) e Ferreira *et al* (2003) procuram viabilizar uma solução eficiente de cobertura dos vagões ferroviários para reduzir a emissão de material particulado durante a etapa de transporte do carvão.

Dentre as principais implicações na saúde humana da exploração do carvão, as doenças pulmonares sobressaem-se, sendo as pneumoconioses as mais prevalentes. A pneumoconiose é uma doença ocupacional decorrente da inalação de poeiras inorgânicas e orgânicas em suspensão nos ambientes, que leva a alterações do parênquima pulmonar (setor responsável pela troca de gases no aparelho respiratório), podendo comprometer a função pulmonar.

1.4 Caracterização do problema: vento em pilhas de carvão

Conforme Helgen e Moore (1996) *apud* Ortiz e Teixeira (2002), a erosão física em pilhas de material estéril (figura 1.4) e o lançamento de rejeitos finos geralmente fazem com que se ultrapasse a capacidade de transporte de sedimentos em sistemas fluviais receptores resultando no assoreamento do leito fluvial e em alargamento da planície de inundação.



**Figura 1.4 – Processo de erosão de uma pilha de material estéril.
Fonte: Loredou-Souza *et al* (2006).**

Para a *United States Environmental Protection Agency* (2001), as emissões industriais podem ser reduzidas através da aplicação de medições, métodos, processos, sistemas e técnicas. Estas atividades podem incluir:

- Redução do volume de poluentes ou eliminação das emissões através da mudança de processos ou adoção de novos materiais;
- Sistemas ou processos de enclausuramento para eliminar emissões;
- Coleta, captura ou tratamento de poluentes quando estes são liberados de um processo, chaminé, armazenagem ou pontos de fuga de emissões;
- Projeto, equipamento, trabalho prático ou procedimento operacional, incluindo treinamento de funcionários e certificação.

A aspersão de água nas estradas e acessos e a plantação de cortinas verdes normalmente compostas por eucaliptos no entorno das áreas industriais e ao longo das estradas permanentes procuram minimizar os efeitos da propagação dos materiais particulados no ambiente.

Uma forma de abordagem do problema é a modelagem física de problemas de erosão eólica de materiais particulados como o carvão através de modelos em escala reduzida testados em túneis de vento de camada limite atmosférica. Esse tipo de modelagem permite a simulação de diversos parâmetros do problema e de várias soluções alternativas para comparação dos resultados.

Foram feitos estudos em túnel de vento por Loredou-Souza *et al* (2006) com o objetivo de analisar uma situação específica de erosão de pilhas de carvão em um pátio de estocagem da *Companhia Vale do Rio Doce*, em Vitória, no Espírito Santo, e avaliar a possibilidade de proteção do pátio com telas de proteção. Dentro deste contexto, este trabalho de dissertação analisou parte dos dados dos ensaios deste estudo, complementando com ensaios de configurações não testadas anteriormente.

1.5 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência de telas de proteção na aerodinâmica de pilhas de carvão. Nesse trabalho pretende-se:

- Determinar a influência espacial da tela de proteção sobre uma pilha típica de carvão;
- Determinar a influência da presença de mais de uma tela de proteção, localizadas a sotavento e barlavento da pilha;

1.6 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos. No primeiro, faz-se uma introdução à problemática ambiental, caracteriza-se o problema a ser abordado e apresentam-se os objetivos deste trabalho.

No segundo capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica, dividida em três partes. A primeira parte apresenta as características do fenômeno de erosão de material particulado. A segunda parte trata dos mecanismos de transporte do grão, descrevendo o momento inicial do processo de movimentação da partícula e os três modos básicos de transporte – saltação, rolamento e suspensão. A terceira parte apresenta de forma geral um mecanismo de proteção de erosão utilizado na engenharia do vento – as barreiras ou quebra-ventos, discutindo-se a aerodinâmica desses dispositivos. Também é apresentado um breve histórico das simulações e estudos realizados por outros pesquisadores nesta área e trata-se da proteção de pilhas de carvão com o uso de telas porosas.

No terceiro capítulo aborda-se a metodologia utilizada ao longo do projeto de dissertação. As principais características do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann e dos equipamentos de medição que foram utilizados são apresentadas. São também descritos os procedimentos de ensaios e as características do modelo, dos casos analisados e do vento simulado. No quarto capítulo faz-se a análise dos resultados obtidos e no quinto capítulo apresentam-se as conclusões e sugestões para a continuidade dos trabalhos. As referências utilizadas são apresentadas no último capítulo.

Capítulo 2 – Caracterização do Fenômeno e Revisão Bibliográfica

2.1 Caracterização do Fenômeno

O transporte por ação do vento de material particulado como areia, silte e partículas de carvão, entre outros, ocorre em uma grande variedade de condições naturais ou antropogênicas. É um assunto que tem despertado interesse em pesquisadores do mundo todo nas últimas décadas, porém ainda existe uma lacuna de conhecimentos na área. Encontra-se pouco material disponível sobre o assunto e, com frequência, abordando prioritariamente o transporte hidráulico, e não eólico, de partículas.

Considera-se neste trabalho um material granular ou particulado como sendo uma grande quantidade de partículas sólidas, ou grãos, de dimensões reduzidas quando comparadas com as escalas principais do escoamento. Em geral, admite-se que o material granular tem coesão nula e é incompressível. Assume-se também que todos os grãos têm a mesma massa específica ρ_s . Além disso, para uma determinada curva granulométrica, estando o material bem misturado, podemos considerá-lo homogêneo e isotrópico. Dessa maneira, as propriedades avaliadas independem da direção e posição escolhida.

Caracteriza-se um material granular não-coeso pela sua massa específica ρ_s , pelo tamanho absoluto dos seus grãos D e por suas propriedades geométricas, como o formato dos grãos e a curva de distribuição granulométrica.

Yalin (1977) discorre sobre simplificações nos parâmetros dos grãos. Para ele, é o formato da partícula que define as funções de relação entre os parâmetros. Isto é, para uma dada geometria em particular, o valor de uma propriedade G qualquer é dado por:

$$G = f_G(g_1, g_2, g_3, \dots, g_n). \quad (2.1)$$

Para uma geometria diferente, essa propriedade G será definida pelos mesmos parâmetros $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$, porém relacionados por uma função diferente:

$$G = f_G'(g_1, g_2, g_3, \dots, g_n) \quad (2.2)$$

Dessa maneira, para dois materiais granulares de mesma geometria, as funções f_G e f_G' serão idênticas. Assim, segundo Yalin (1977), pode-se simplificar o problema e dizer que são necessários apenas a massa específica ρ_s e o tamanho absoluto (representado pelo diâmetro D) para identificar um dado material.

Considerando que um escoamento pode ser definido por suas características como perfil de velocidades médias e intensidade de turbulência. Por conseguinte, para Yalin (1977) um escoamento uniforme estacionário bidimensional envolvendo um material granular não-coeso de uma dada geometria é definido pelos parâmetros massa específica do fluido, viscosidade do fluido, massa específica dos grãos, diâmetro dos grãos, perfil de velocidades e intensidade de turbulência do escoamento.

2.2 Os mecanismos de transporte das partículas

O vento atuante na região próxima à superfície de pilhas de estocagem de material estéril é responsável pelo processo de erosão das partículas finas. Atuam sobre as partículas as forças de gravidade, pressão e viscosidade. A força de gravidade depende do diâmetro da partícula e de sua massa específica; as forças de pressão e viscosidade dependem do campo de escoamento gerado em torno da pilha. A resultante destas três forças, se decomposta na direção do escoamento e na direção perpendicular ao mesmo, resulta nas chamadas forças aerodinâmicas: força de sustentação (\vec{F}_L) e força de arrasto (\vec{F}_D).

Du Boys (1879) *apud* Yalin (1977) acreditava que o transporte de material granular ocorria quando o escoamento, exercendo sobre os grãos uma tensão de cisalhamento τ_o , maior que uma determinada tensão crítica de cisalhamento $(\tau_o)_{cr}$ arrastava com uma velocidade u_1 uma primeira camada de grãos (inicialmente em repouso) imersos no escoamento. Dessa maneira, a condição $\tau_o > (\tau_o)_{cr}$ seria necessária para movimentar uma primeira camada que, por sua vez, induziria o movimento de uma segunda camada imediatamente inferior com velocidade u_2 que, analogamente, induziria o movimento da terceira camada com velocidade u_3 e assim sucessivamente. Sugeria-se que as velocidades u_i ($i=1, 2, 3, \dots$) das camadas decresceriam de acordo com a relação linear $\frac{z_i}{u_i} = \text{constante}$, onde z_i é a altura da camada i .

De acordo com Velikanov (1910) *apud* Yalin (1977), Krey foi o primeiro a observar que o movimento dos grãos não tinha nada em comum com o modelo de Du Boys. Segundo Yalin (1977), Krey e posteriormente outros pesquisadores verificaram que o escoamento apenas coloca em movimento a camada mais externa de grãos. Como consequência dessa afirmação, os grãos dispersos no escoamento podem ter origem apenas nessa camada mais externa do leito, na interface fluido-partícula. Quando o valor da tensão de cisalhamento τ_o atuante sobre o grão supera a tensão crítica de cisalhamento $(\tau_o)_{cr}$, mantendo-se, entretanto, menor do que um determinado valor de tensão de cisalhamento limite $(\tau_o)'_{cr}$ os grãos saltam (e menos usualmente rolam) uns sobre os outros:

$$(\tau_o)_{cr} < \tau_o < (\tau_o)'_{cr} . \quad (2.3)$$

Quando τ_o excede $(\tau_o)'_{cr}$ verifica-se uma grande quantidade de grãos suspensos no escoamento:

$$(\tau_o)_{cr} < (\tau_o)'_{cr} < \tau_o . \quad (2.4)$$

Yang (1996) evidenciou outros critérios associados ao estado de movimentação iminente de partículas imersas em água estabelecidos por Fortier e Scobey (1926), Hjulstrom (1935), Shields (1936), White (1940) e ele próprio (Yang, 1996). Essas análises apresentadas, entretanto, desconsideram os efeitos das forças de pressão atuantes nos grãos.

A figura 2.1 apresenta as forças atuantes em um único grão isolado de diâmetro D sobre uma superfície inclinada, formando um ângulo θ com o plano horizontal, onde atuam a força de arrasto \vec{F}_D e a força de sustentação \vec{F}_L , que são as forças aerodinâmicas responsáveis pelo movimento do grão. Além destas, atuam também a força peso \vec{P} e força de atrito \vec{F}_A .

A partícula estará em estado de movimentação quando pelo menos uma das três afirmativas a seguir for satisfeita:

$$F_L \geq P \cos\theta , \quad (2.5)$$

$$F_D \geq P \operatorname{sen}\theta + F_A, \quad (2.6)$$

$$M_O = \frac{D}{2}(F_D - P \operatorname{sen}\theta) \geq M_R, \quad (2.7)$$

sendo M_O o momento atuante no ponto O de contato com a superfície devido à força de arrasto \vec{F}_D e M_R o momento resistente devido à força \vec{P} .

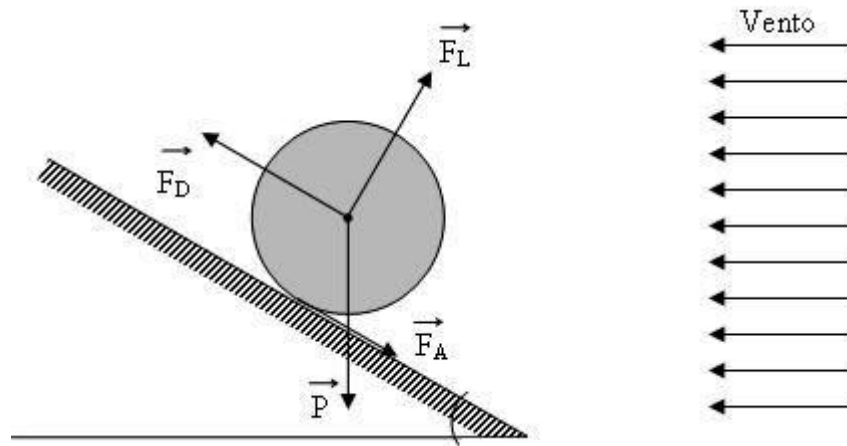


Figura 2.1 – Balanço de forças em um grão isolado.

Admita-se agora que, no início do processo de transporte, o leito de material particulado forme um ângulo θ com a horizontal, conforme mostrado na figura 2.2. Seja \vec{R} o vetor resultante das forças \vec{F}_L e \vec{P} atuantes em um grão unitário:

$$\vec{R} = \vec{F}_L + \vec{P} \quad (2.8)$$

O vetor \vec{P} , que representa o peso do grão, se mantém constante e é igual a:

$$\vec{P} = m \vec{g}, \quad (2.9)$$

sendo m a massa da partícula e \vec{g} a força de aceleração da gravidade atuante. O vetor \vec{F}_L , por sua vez, representa as forças de pressão por ação do vento e é diretamente proporcional à intensidade do escoamento, aumentando à medida que o módulo da velocidade \vec{V} do escoamento aumenta. Seja s a reta suporte da força \vec{F}_L , que forma um ângulo $\alpha = 90 - \theta$ com a horizontal. Por simplicidade, admite-se que o ângulo α não varie. Dessa maneira, a

posição do vetor resultante \vec{R} dependerá unicamente da força \vec{F}_L . Assim, a extremidade final do vetor \vec{R} se moverá sobre uma reta s' que contém o ponto final do vetor \vec{P} , paralela à reta suporte s .

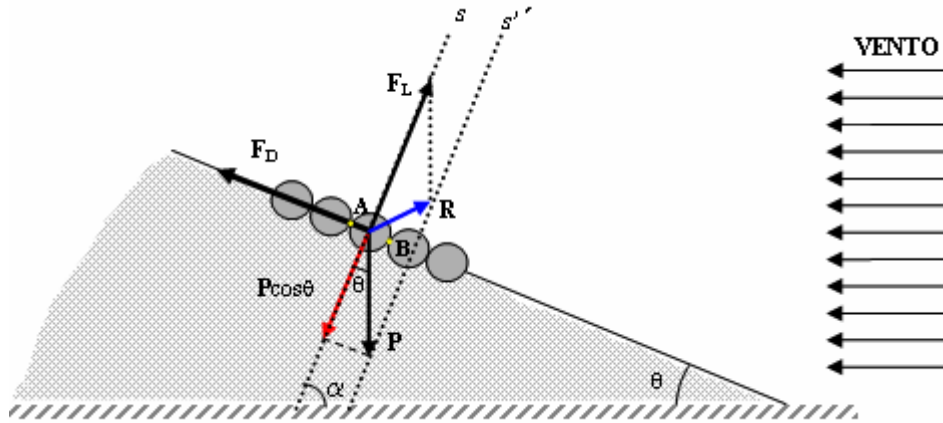


Figura 2.2 – Balanço de forças em um grão inserido em uma pilha.

Sejam A e B os pontos de contato entre grãos contíguos. Enquanto o vetor \vec{R} estiver entre os pontos A e B existirá contato de um grão com o grão adjacente no ponto A através de uma força \vec{P}_A . No momento que este vetor \vec{R} estiver fora do intervalo \widehat{AB} , atuando apenas acima do ponto B, se desfaz o ponto de contato A e \vec{P}_A se torna nulo, uma vez que o material não tem coesão e, neste caso, as forças de contato não podem ser transmitidas entre os grãos.

Sejam f e ψ o coeficiente e o ângulo de atrito entre os grãos, respectivamente. Então,

$$f = \operatorname{tg} \Psi . \quad (2.10)$$

Considere-se que os valores positivos dos ângulos são medidos no sentido anti-horário. Seja \vec{n} um vetor normal ao plano de contato entre grãos que passa pelo ponto B. O desprendimento do grão ocorrerá quando a força resultante \vec{R} alcançar uma posição tal que o ângulo formado entre os vetores \vec{R} e \vec{n} se torne igual ao ângulo de fricção ψ . Seja φ o ângulo formado entre a direção do escoamento e a reta tangente que une os pontos A e B. Aplicando o teorema dos senos, temos que

$$\frac{F_L}{\text{sen}(\varphi + \Psi)} = \frac{P}{\text{sen} \beta}, \quad (2.11)$$

e considerando

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2}\right) - (\varphi + \Psi - \theta), \quad (2.12)$$

chega-se à seguinte condição para o desprendimento de um grão individual:

$$\frac{F_L}{P} \geq \frac{\text{sen}(\varphi + \psi)}{\cos[\theta - (\varphi + \psi)]}. \quad (2.13)$$

Portanto, o desprendimento do grão ocorre quando o valor da razão F_L/P , que aumenta com V , excede um certo limite determinado pelos ângulos φ , ψ e θ . O ângulo φ depende inteiramente da geometria do grão e do ambiente. O ângulo θ é também determinado pela geometria e pelo número de Reynolds. O ângulo de fricção ψ depende da micro-geometria dos grãos, ou seja, é função das condições das superfícies dos grãos em contato com as outras. Assim, o valor de F_L/P correspondente ao desprendimento do grão varia em função da geometria (no sentido mais amplo da palavra) e, em geral, do número de Reynolds.

Uma vez que a partícula entre em movimento, pode desenvolver três tipos de movimentos: rolamento, saltação e suspensão (figura 2.3). O rolamento se caracteriza pela translação dos grãos sobre uma superfície, na direção do escoamento, girando ao redor de um eixo perpendicular ao escoamento principal. Esse fenômeno depende do campo de velocidades do vento próximo à superfície da pilha e ocorre quando o momento atuante M_0 supera o momento resistente M_R e, ao mesmo tempo, \bar{F}_L se mantiver menor que \bar{P} (ou, no máximo, ligeiramente superior). O mecanismo inicial da saltação e da suspensão é o mesmo, sendo dependentes do campo de pressões gerado pelo escoamento no entorno da pilha. Para que ocorram, faz-se necessário que em um instante inicial a força \bar{F}_L supere a força peso \bar{P} . Nesse momento, o grão inicia um processo de suspensão no escoamento e permanece assim até que a força \bar{P} supere a força \bar{F}_L . Nesse momento, o grão inicia o retorno à superfície do leito granular.

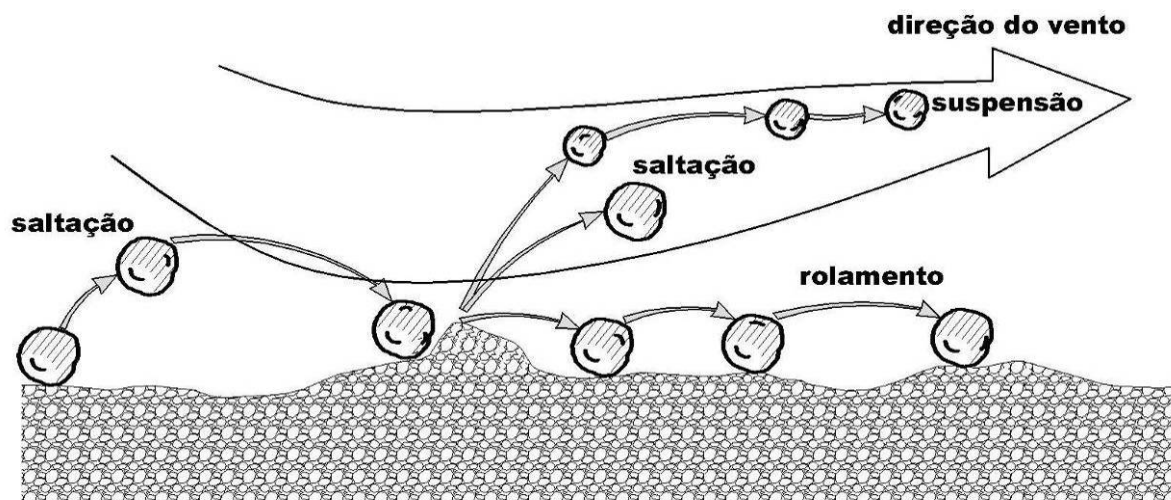


Figura 2.3 – Mecanismos de movimento de um grão.
Fonte: Loredou-Souza e Schettini (2005).

Kind (1990) afirma que o processo de saltação é responsável pela maior parte da erosão de material particulado, embora a altas velocidades do vento o processo de suspensão também seja importante. Lee *et al* (2002) indicam que partículas com diâmetro menor que 100 μm normalmente estão envolvidas no processo de suspensão, enquanto que a saltação envolve partículas com diâmetros da ordem de 100 a 1000 μm . O diâmetro médio das partículas que se movimentam por rolamento é maior que 1000 μm .

É certo que a estrutura mecânica do escoamento é fator determinante para ocorrer movimentação dos grãos, entretanto esse movimento está relacionado também com as características físicas do material particulado em si.

Em escoamentos com regime de alto grau de turbulência é possível que um grão suspenso com uma força \vec{F}_L de forma a iniciar um salto possa ser suspenso com uma força grande o suficiente para entrar na região do escoamento onde as forças de flutuação que agem sobre o grão serão semelhantes, ou mesmo maiores, que o peso \vec{P} do grão. A trajetória do grão, neste caso, será guiada pelo movimento aleatório das forças da turbulência. Não seguirá mais a trajetória T_b mostrada na figura 2.4, e sim a trajetória aleatória probabilística T_s de uma partícula em suspensão. Para Yalin (1977), não existe um limite claro de trajetórias “suspensas”, tais como T_s , e das trajetórias de saltação, tais como T_b . A trajetória média das partículas saltantes é afetada diretamente pela intensidade do escoamento, pelo aumento do número de Reynolds e pela intensidade da turbulência.

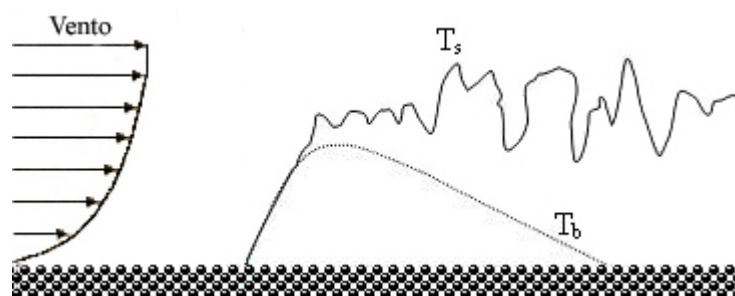


Figura 2.4 – Trajetórias de uma partícula em saltação e em suspensão.
Fonte: adaptada de Yalin (1977).

2.3 Mecanismos de proteção

Há muito tempo o homem utiliza elementos de barreira para controlar a erosão eólica, principalmente para a proteção de zonas agrícolas. Esses elementos de proteção são chamados também de quebra-ventos, e podem ter configurações e materiais bastante variados. Pode-se citar a proteção por vegetação, muros, cercas e telas. Uma atenção especial será dada nesse trabalho às telas, que são elementos bidimensionais, com altura e largura consideráveis, mas de espessura insignificante. Atualmente são bastante utilizadas para prevenir a erosão do solo, acumulação de neve e dispersão de poluentes.

2.3.1 A aerodinâmica do quebra-vento

Verifica-se que certos fatores têm um efeito importante na definição das características do escoamento na esteira de um quebra-vento. Em particular, pode-se citar as dimensões do quebra-vento, seu formato, sua permeabilidade¹ e a distribuição e grau de flexibilidade de seus elementos constituintes. Além disso, são importantes as características do vento incidente e as características da região de entorno (Gandemer, 1979).

O princípio de funcionamento de um quebra-vento é basicamente o seguinte: em um primeiro momento, o quebra-vento altera o campo de escoamento, causando uma perda de quantidade de movimento no escoamento incompressível e, conseqüentemente, um efeito de proteção. À medida que se reduz a permeabilidade do quebra-vento, o escoamento que flui através do material diminui e a força de arrasto aumenta. Ao mesmo tempo, ocorre uma

¹ A permeabilidade ou porosidade ϵ de um quebra-vento pode ser definida como a relação entre a área aberta e a área total da estrutura.

deflexão do escoamento para cima e, abaixo de determinada permeabilidade, verifica-se uma grande região de separação do escoamento a sotavento do quebra-vento. Quanto menor for a permeabilidade da barreira, mais intensos se tornam os turbilhões na esteira e mais afastado estará o ponto de recolamento do escoamento (figuras 2.5 e 2.6).

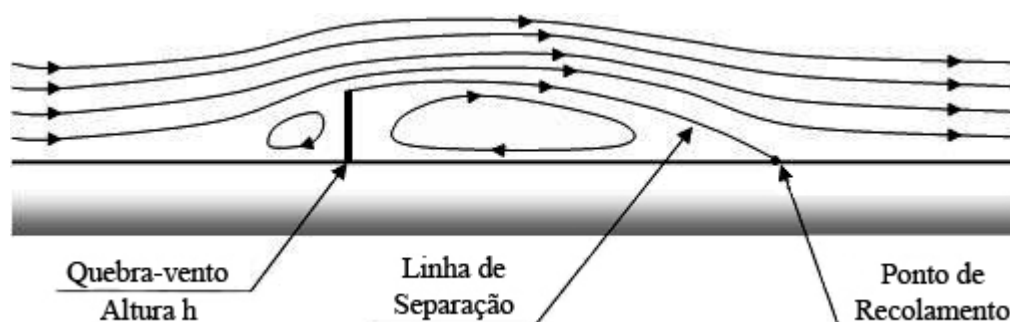


Figura 2.5 – Linhas de corrente de um escoamento com barreira sólida.
Fonte: adaptada de Gandemer (1979).

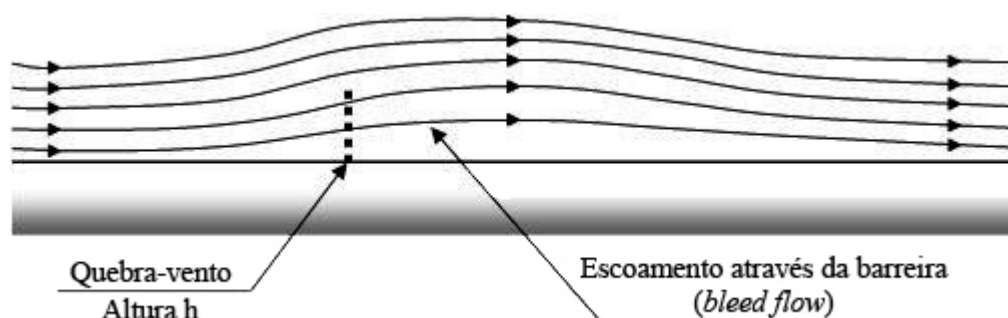


Figura 2.6 – Linhas de corrente de um escoamento com barreira porosa.
Fonte: adaptada de Gandemer (1979).

Kaiser (1959) *apud* Raine e Stevenson (1977) foi provavelmente o primeiro a mostrar que embora um quebra-vento menos permeável possa oferecer uma maior redução das velocidades médias do escoamento, o grande aumento da turbulência a sotavento dessa barreira torna os quebra-ventos mais permeáveis mais eficientes para proteção. Entretanto, estudos de Gandemer (1979) indicam que quebra-ventos com porosidades acima de 70% têm pouco ou nenhum efeito de proteção no início da esteira, e no final da esteira têm sua proteção bastante reduzida.

Raine e Stevenson (1977) afirmam que não existem soluções analíticas satisfatórias para a equação de Navier-Stokes no escoamento altamente turbulento que existe ao redor de um quebra-vento. Dessa maneira, é inevitável a adoção de formulações empíricas para descrever o escoamento. Dados experimentais mostram que o arrasto sobre um quebra-vento aumenta com o decréscimo da porosidade e com o aumento da relação h/z_0 (sendo h a altura do quebra-vento e z_0 a rugosidade do terreno).

Baseado nessa relação h/z_0 , Plate (1971) *apud* Raine e Stevenson (1977) sugeriu uma formulação para o cálculo do coeficiente de arrasto que indica que quanto menos rugoso for o terreno, maior será a redução da velocidade média a sotavento do quebra-vento. Por outro lado, quanto maior for a rugosidade do terreno e quanto mais turbulento for o escoamento (indicado por um maior expoente p na lei de potências que descreve o perfil de velocidades médias), menor será a zona a sotavento com velocidades médias reduzidas.

Raine e Stevenson (1977) relatam que tanto Jensen (1958) como Kaiser (1959) concluíram que em um escoamento incidente plenamente desenvolvido, turbulento e em estabilidade neutra, os padrões desenvolvidos a sotavento do quebra-vento devem ser independentes da velocidade de aproximação do escoamento. Além disso, a queda de pressão que ocorre na porção do escoamento que passa através do quebra-vento (*bleed flow*) é compensada por um acréscimo de pressão a sotavento no escoamento principal. Essa queda de pressão aumenta à medida que diminui a porosidade da barreira. Dados de campo e de ensaios mostram que com o aumento da permeabilidade ocorre uma menor contribuição para a diminuição da velocidade média e da intensidade de turbulência na parte inicial da esteira, enquanto que na parte final ocorre uma recuperação lenta das condições do escoamento original. Ao mesmo tempo, o ponto de valor mínimo da velocidade média, que ocorre próximo ao solo, se move para sotavento e se posiciona próximo à zona de maior turbulência.

Gandemer (1979) estudou a aerodinâmica de diferentes tipos de quebra-ventos, incluindo vegetação, e discutiu os resultados em termos de conforto de pedestres. O autor fez comparações em termos de velocidades médias e turbulência, introduzindo um parâmetro adimensional f (chamado de fator de proteção) como um parâmetro de comparação.

Raine e Stevenson (1977) indicam uma permeabilidade ótima ao redor de 35% a 50% como consenso entre pesquisadores. Além disso, uma barreira efetiva de altura h deve fornecer uma redução de 50% da velocidade média até uma distância de $10h$ a sotavento, 20% até a distância de $20h$ e uma redução máxima de 70% a 80% entre $1h$ e $5h$, esses valores medidos a uma altura $z/h = 0,5$. Os efeitos do quebra-vento podem ser ainda notados até uma distância entre $60h$ a $100h$ a sotavento. Eles concluíram que barreiras de permeabilidade baixa a média dão uma proteção melhor do que barreiras sólidas, com um custo em geral menor.

Além disso, Gandemer (1979) ressalta que a ventilação da esteira na base do quebra-vento parece ter função decisiva no efeito de proteção e que quebra-ventos com permeabilidade entre 0% e 20% fazem com que ocorra uma interferência na zona protegida por parte do escoamento que desenvolve uma grande velocidade nas extremidades da barreira. Ele indica ainda que, com relação a aspectos econômicos, a associação de barreiras pode ser interessante, pois aparentemente o custo de construção não segue uma relação linear com a altura do elemento de proteção.

Em geral, todas as medições realizadas em ensaios são referentes à linha central da barreira. Gandemer (1981) fez um estudo avaliando o efeito de várias configurações para as extremidades finais das barreiras, uma vez que nessa região ocorre um aumento da velocidade do vento e uma diminuição da proteção. Os resultados mostram que uma configuração diferenciada (em forma de escada, com porosidade crescente ou com outra barreira perpendicular na extremidade, conforme mostra a figura 2.7) para os últimos 10 metros pode mitigar os efeitos deste fenômeno.

Na mesma época, Ranga Raju *et al* (1988) avaliaram o coeficiente de arrasto de barreiras porosas, chegando à conclusão que este é função da porosidade e da relação entre a altura da barreira e a rugosidade do entorno.

2.3.2 Proteção de pilhas de carvão

Existem poucos trabalhos publicados em periódicos internacionais relacionados com a erosão de pilhas de carvão. Um dos primeiros trabalhos foi conduzido por Borges e Viegas (1988) em uma importante termoelétrica portuguesa. Nesse estudo, eles simularam em túnel de vento pilhas de carvão em escala reduzida (1/500) avaliando, em um primeiro momento, o escoamento bidimensional perpendicular a uma fileira de quatro pilhas. Em um segundo

momento, avaliaram o efeito da direção do vento sobre o fenômeno. Os resultados obtidos foram integrados para avaliar as taxas de emissão de pó de carvão para as várias configurações estudadas. Nesse trabalho foram estudadas seis configurações diferentes de proteção, variando a altura e a porosidade da tela. As relações h/H (sendo h a altura da tela e H a altura da pilha) ensaiadas foram 0, 0,75 e 1,0. As porosidades de tela ensaiadas foram 0%, 35%, 50% e 100%.

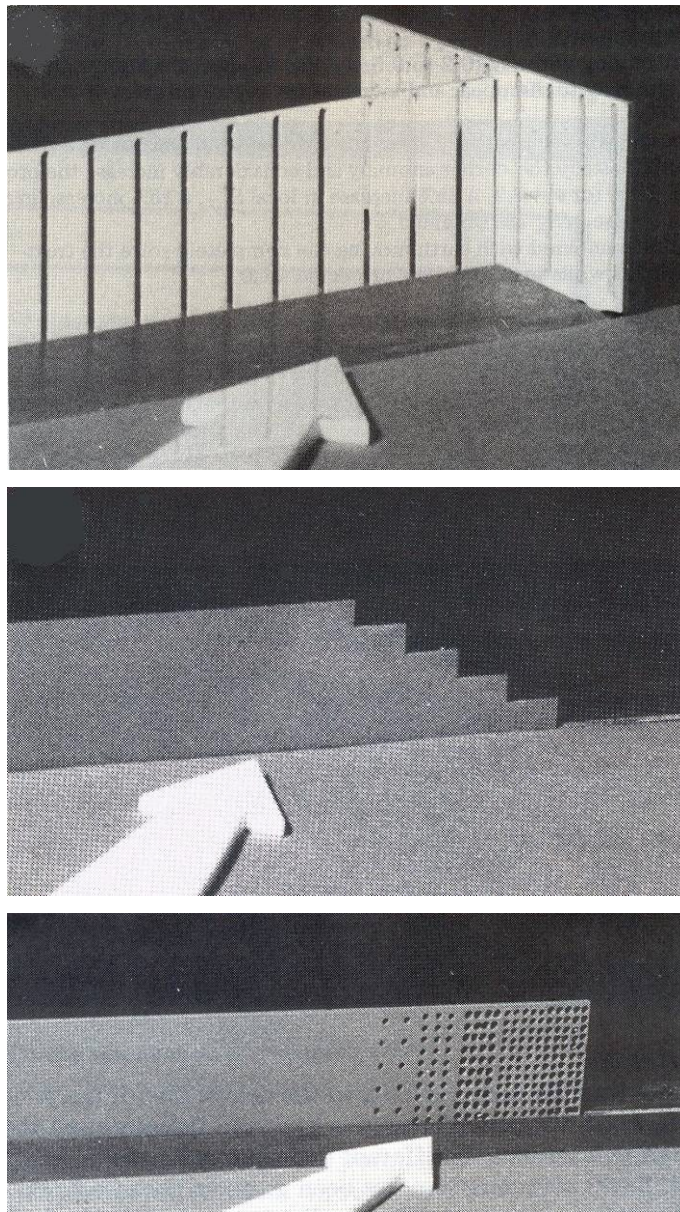


Figura 2.7 – Diferentes configurações da extremidade da tela.
Fonte: Gandemer (1981).

Lee e Park (2000) publicaram um trabalho sobre o estudo experimental em modelos em escala reduzida (1/800) das pilhas de carvão do pátio de armazenamento de carvão da POSCO, na Coreia do Sul, uma das maiores siderúrgicas do mundo. Os experimentos tiveram um número de Reynolds baseado na altura da pilha igual a 18000 e avaliaram as distribuições de pressões médias e flutuantes na superfície das pilhas para várias direções de incidência do vento. A tela com porosidade $\varepsilon = 40\%$ foi considerada a mais adequada para reduzir as pressões médias e flutuantes nas pilhas. Além disso, chegaram à conclusão que a melhor opção seria o cercamento total do pátio de armazenamento. Fotografias das telas após a implementação são mostradas nas figuras 2.8 e 2.9



**Figura 2.8 – Telas instaladas em POSCO, Coreia do Sul.
Fonte: POSCO (2005).**

Em outro trabalho, Lee e Park (2002) afirmaram que as telas mantêm seu efeito de proteção até a quinta ou sexta pilha consecutiva e que a velocidade crítica para o início da erosão é afetada diretamente pelo diâmetro da partícula e pela altura da tela. Em estudos publicados anteriormente (LEE e PARK, 1999) mostraram que uma tela adicional a sotavento poderia diminuir consideravelmente as flutuações de pressão.

Schettini e Loredo-Souza (2004) simularam em túnel de vento o escoamento em um pátio de armazenamento de carvão de uma grande mineradora brasileira. Foi ensaiado um conjunto de 41 pilhas do pátio em escala 1/1000. Foram ensaiadas telas com duas alturas (1,5H e 2,0H) e três porosidades diferentes (37%, 53% e 68%), e medidos os dados de velocidades instantâneas do vento e pressões na superfície da pilha. Seus estudos indicaram que a configuração mais adequada para a redução dos efeitos do vento naquela situação é o

cercamento total do setor com tela de porosidade 37% e altura 1,5H. Foi observada também a influência positiva de telas a barlavento e a sotavento da pilha na redução das flutuações de pressão, especialmente para ventos oblíquos. Esses estudos mostraram a necessidade de estudar o escoamento ao redor de uma pilha isolada, com a presença de telas de proteção.



**Figura 2.9 – Telas instaladas em POSCO, Coréia do Sul.
Fonte: POSCO (2005).**

Capítulo 3 – Ensaios em Túnel de Vento

3.1 O programa experimental

Para o estudo foi utilizado um modelo reduzido de uma pilha de carvão típica em escala 1/125, confeccionado em madeira e alumínio. As dimensões do modelo estão indicadas na figura 3.1. O modelo foi instrumentado com 62 tomadas de pressão para medição das pressões médias e flutuantes em sua superfície, distribuídas em um quadrante de sua superfície, conforme indicado na figura 3.2. O modelo corresponde a uma pilha, em escala real, de dimensões 40 m (largura) \times 16 m (altura) \times 80 m (comprimento) e seção transversal triangular. Estas dimensões e forma são características típicas de pilhas de carvão em pátios de estocagem, e foram fornecidas pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). A tabela 3.1 apresenta as coordenadas da projeção das tomadas de pressão na projeção do modelo, considerando a origem do eixo coordenado no centro da pilha, como indica a figura 3.2.

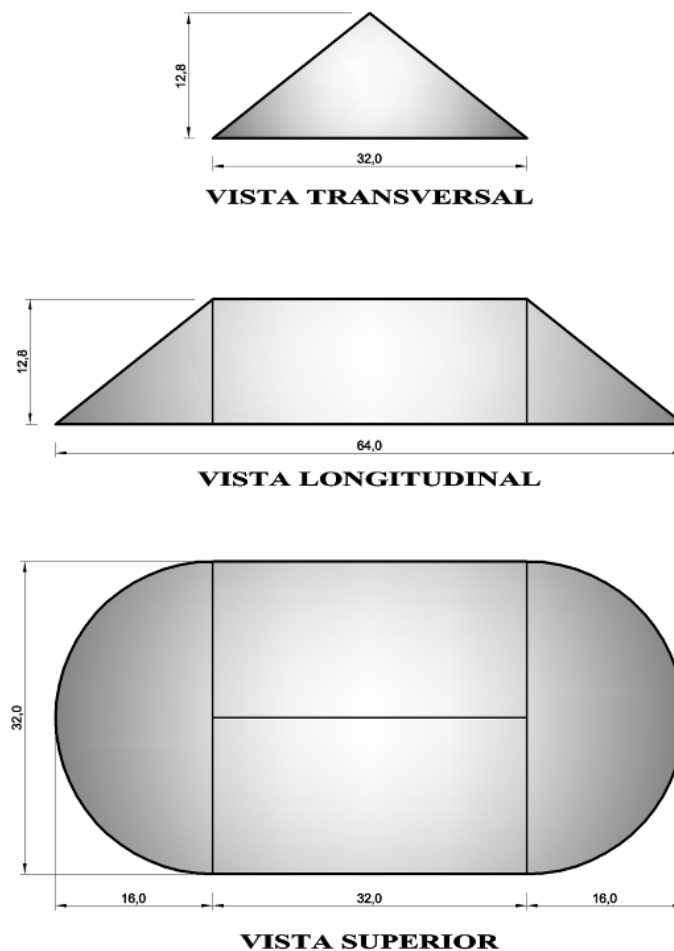


Figura 3.1 – Características geométricas do modelo (dimensões em cm).

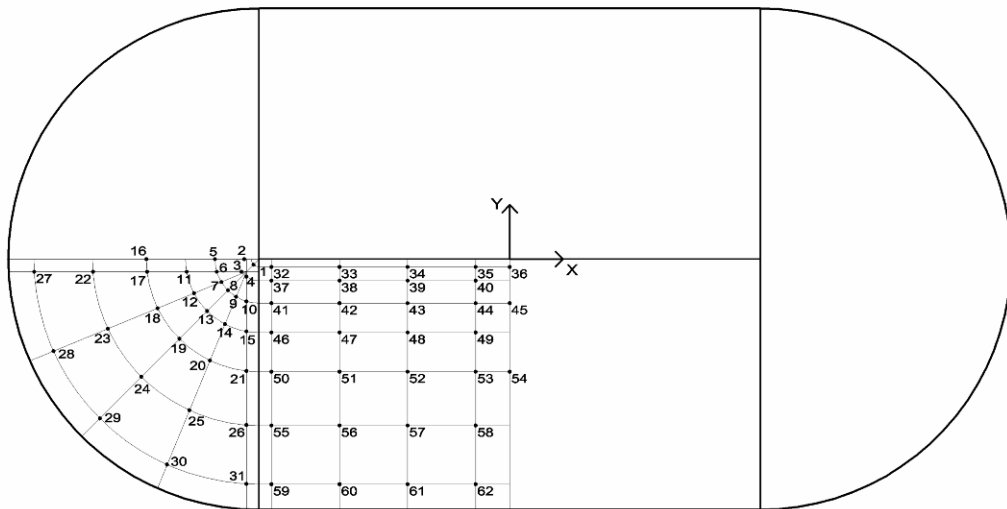


Figura 3.2 – Localização das tomadas de pressão na superfície externa do modelo projetada.

A figura 3.3 mostra uma fotografia do modelo construído para o ensaio da pilha isolada, dentro do túnel de vento.



Figura 3.3 – Modelo da pilha de carvão.

Tabela 3.1 – Coordenadas da projeção das tomadas de pressão na superfície externa do modelo.

Tomada	Coordenada		Tomada	Coordenada	
	X	Y		X	Y
1	-16,35	-0,35	32	-15,20	-0,50
2	-16,93	0,00	33	-10,86	-0,50
3	-17,11	-0,80	34	-6,51	-0,50
4	-16,80	-1,11	35	-2,17	-0,50
5	-18,81	0,00	36	0,00	-0,50
6	-18,69	-0,80	37	-15,20	-1,37
7	-18,40	-1,46	38	-10,86	-1,37
8	-17,98	-1,99	39	-6,51	-1,37
9	-17,46	-2,40	40	-2,17	-1,37
10	-16,80	-2,69	41	-15,20	-2,81
11	-20,61	-0,80	42	-10,86	-2,81
12	-20,14	-2,18	43	-6,51	-2,81
13	-19,31	-3,31	44	-2,17	-2,81
14	-18,18	-4,15	45	0,00	-2,81
15	-16,80	-4,61	46	-15,20	-4,68
16	-23,18	0,00	47	-10,86	-4,68
17	-23,14	-0,80	48	-6,51	-4,68
18	-22,46	-3,13	49	-2,17	-4,68
19	-21,08	-5,08	50	-15,20	-7,18
20	-19,13	-6,46	51	-10,86	-7,18
21	-16,80	-7,14	52	-6,51	-7,18
22	-26,59	-0,80	53	-2,17	-7,18
23	-25,64	-4,44	54	0,00	-7,18
24	-23,50	-7,51	55	-15,20	-10,62
25	-20,44	-9,64	56	-10,86	-10,62
26	-16,80	-10,59	57	-6,51	-10,62
27	-30,34	-0,80	58	-2,17	-10,62
28	-29,11	-5,87	59	-15,20	-14,36
29	-26,15	-10,16	60	-10,86	-14,36
30	-21,86	-13,11	61	-6,51	-14,36
31	-16,80	-14,34	62	-2,17	-14,36

O estudo foi realizado para 71 configurações, as quais são expressas esquematicamente nas figuras 3.7 a 3.11 e indicadas nas tabelas 3.2 a 3.4. As configurações representam distintas combinações de porosidade, altura e disposição das telas em relação à pilha. Nas tabelas 3.2 a 3.4 as configurações são representadas por códigos, os quais têm o seguinte significado:

- *Posicionamento da tela:*

“**AB**” representa tela colocada a barlavento, na posição paralela ao maior eixo geométrico da pilha;

“**EF**” representa a tela colocada a sotavento, posição paralela ao maior eixo geométrico da pilha;

“**CD**” representa tela colocada a barlavento, na posição perpendicular ao maior eixo geométrico da pilha;

▪ *Porosidade da tela:*

“**K**” representa porosidade de 68%,

“**L**” representa porosidade de 53%,

“**M**” representa porosidade de 37% (maior espaçamento entre os fios),

“**N**” representa porosidade de 37% (menor espaçamento entre os fios),

“**O**” representa porosidade de 0% (placa sólida);

▪ *Altura da tela:*

“**R**” representa altura da tela igual à altura da pilha de carvão ($1H$ – sendo H a altura da pilha),

“**S**” representa altura da tela igual a uma vez e meia a altura da pilha de carvão ($1,5H$ – sendo H a altura da pilha);

▪ *Afastamento da tela:*

“**X**” representa afastamento entre tela e pilha igual à metade da altura da pilha ($0,5H$ – sendo H a altura da pilha),

“**Y**” representa afastamento entre tela e pilha igual a uma vez e meia a altura da pilha ($1,5H$ – sendo H a altura da pilha).

As figuras 3.4 a 3.6 mostram fotografias do modelo construído para os ensaios com tela. No Anexo A são mostradas as fotografias de outras configurações ensaiadas.

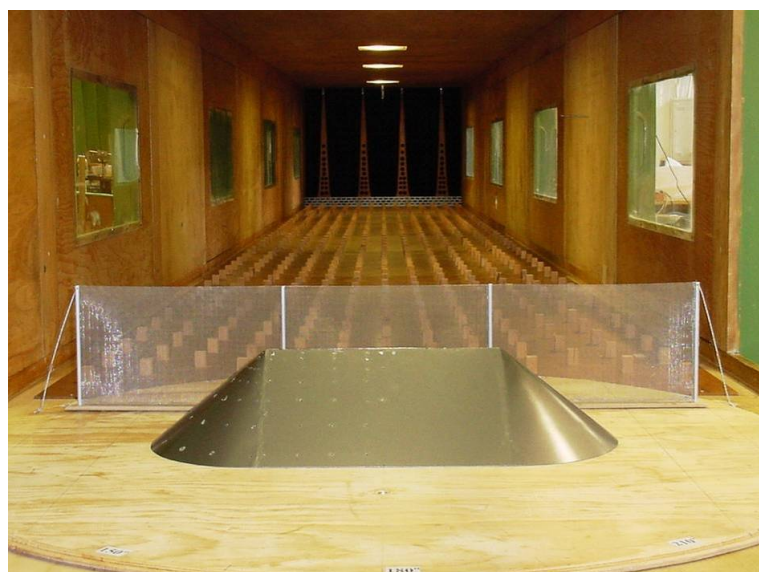


Figura 3.4 – Ensaio do modelo com tela a barlavento (configuração AB MSX).



Figura 3.5 Ensaio do modelo com tela a sotavento (configuração EF MSX).

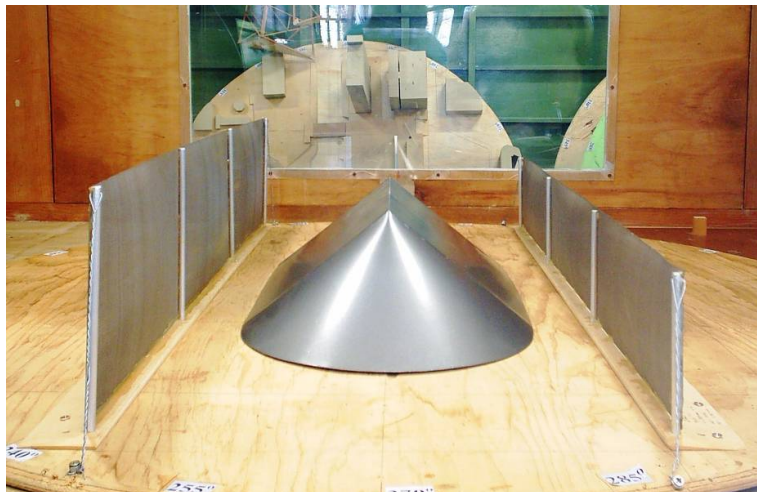
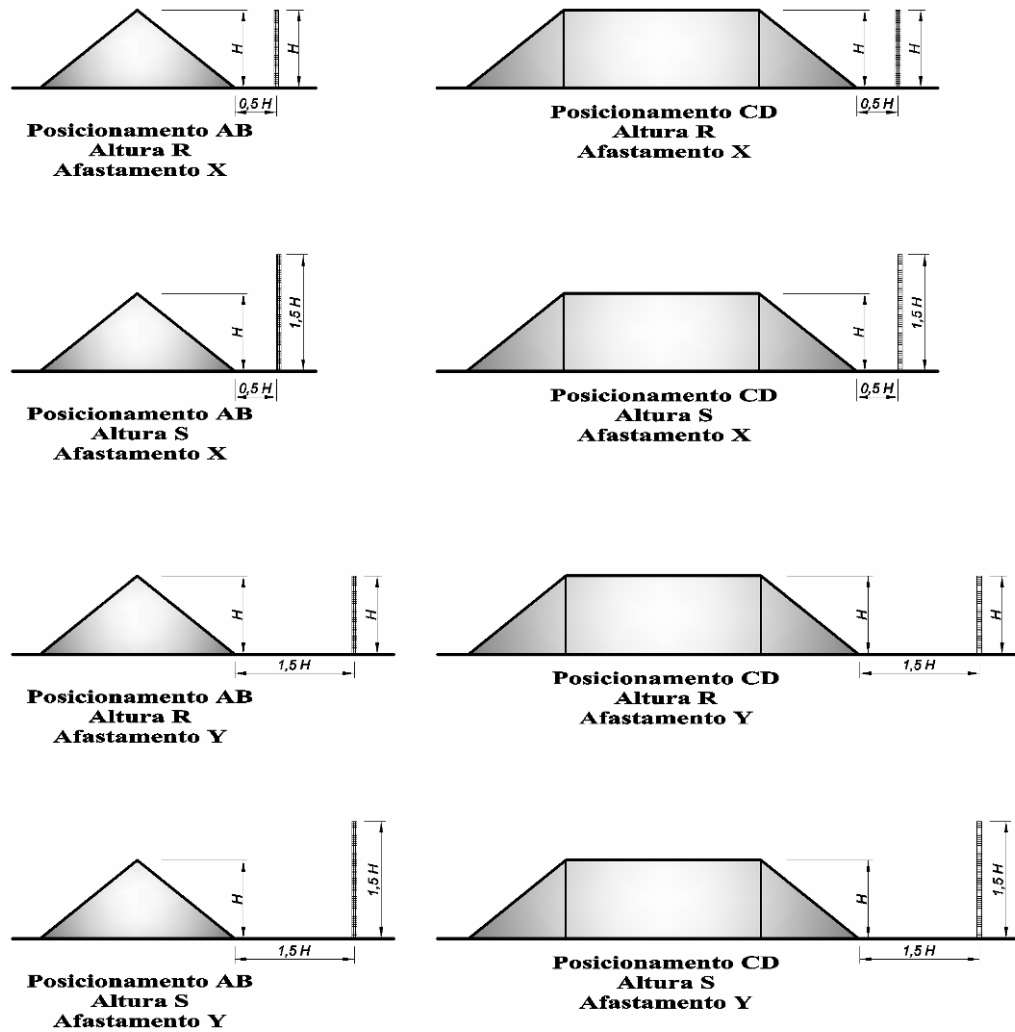
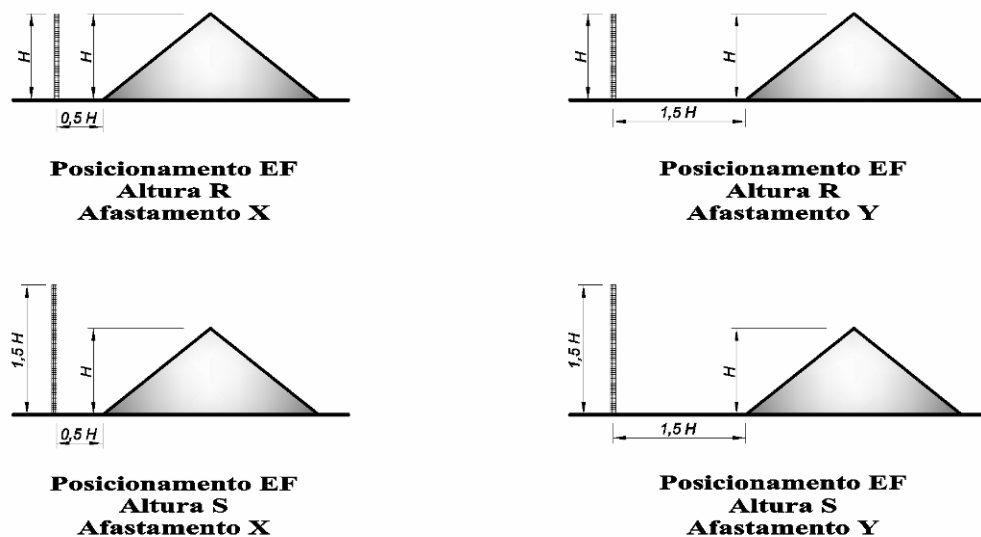


Figura 3.6 – Ensaio do modelo com telas a barlavento e a sotavento (configuração AB LRX + EF LSX).



Referência para posicionamento das telas
Vistas Laterais

Figura 3.7 – Configurações dos ensaios com uma tela a barlavento.



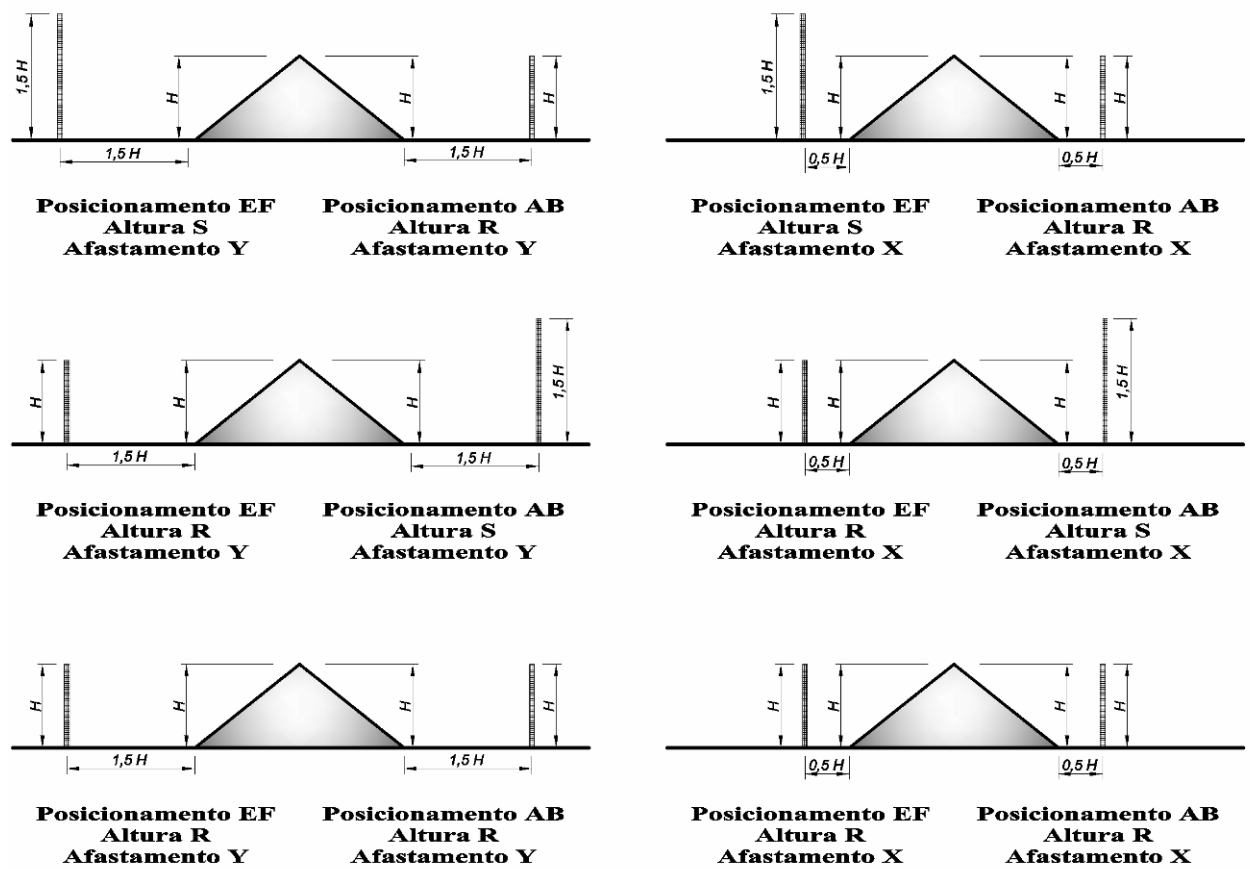
Referência para posicionamento das telas
Vistas Laterais

Figura 3.8 – Configurações dos ensaios com uma tela a sotavento.

A tabela 3.2 mostra as características das malhas utilizadas na confecção das telas e a figura 3.12 mostra uma fotografia dessas malhas.

Tabela 3.2 – Caracterização das malhas utilizadas na confecção das telas.

Tela	Porosidade [%]	Diâmetro do fio [mm]	Abertura da malha [mm]
K	68%	0,28	1,300
L	53%	0,30	0,760
M	37%	0,20	0,300
N	37%	0,10	0,154
O	0%	-	-



Referência para posicionamento das telas
Vistas Laterais

Figura 3.9 – Configurações dos ensaios com duas telas (a barlavento e sotavento).

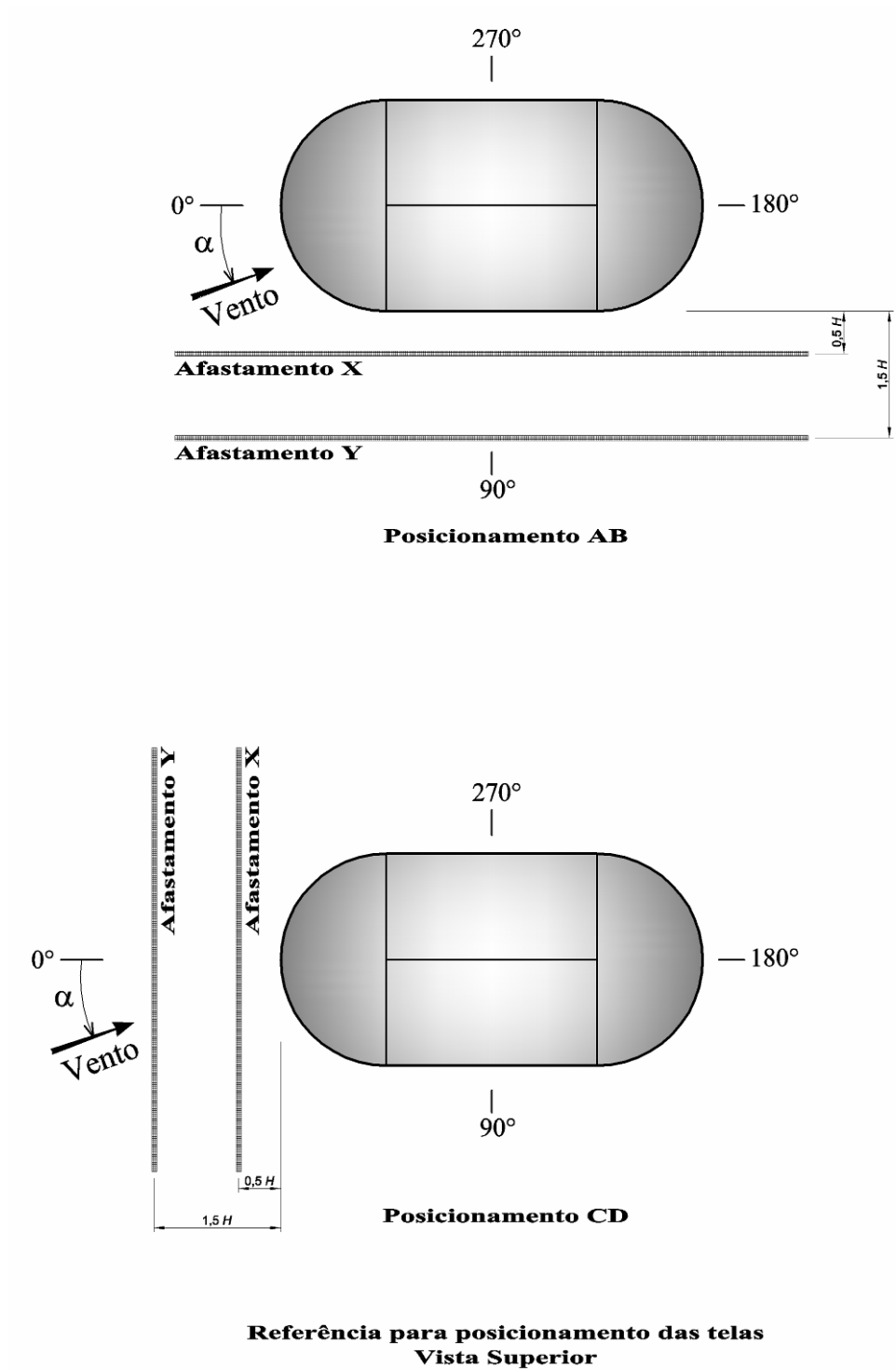


Figura 3.10 – Configurações dos ensaios com uma tela a barlavento.

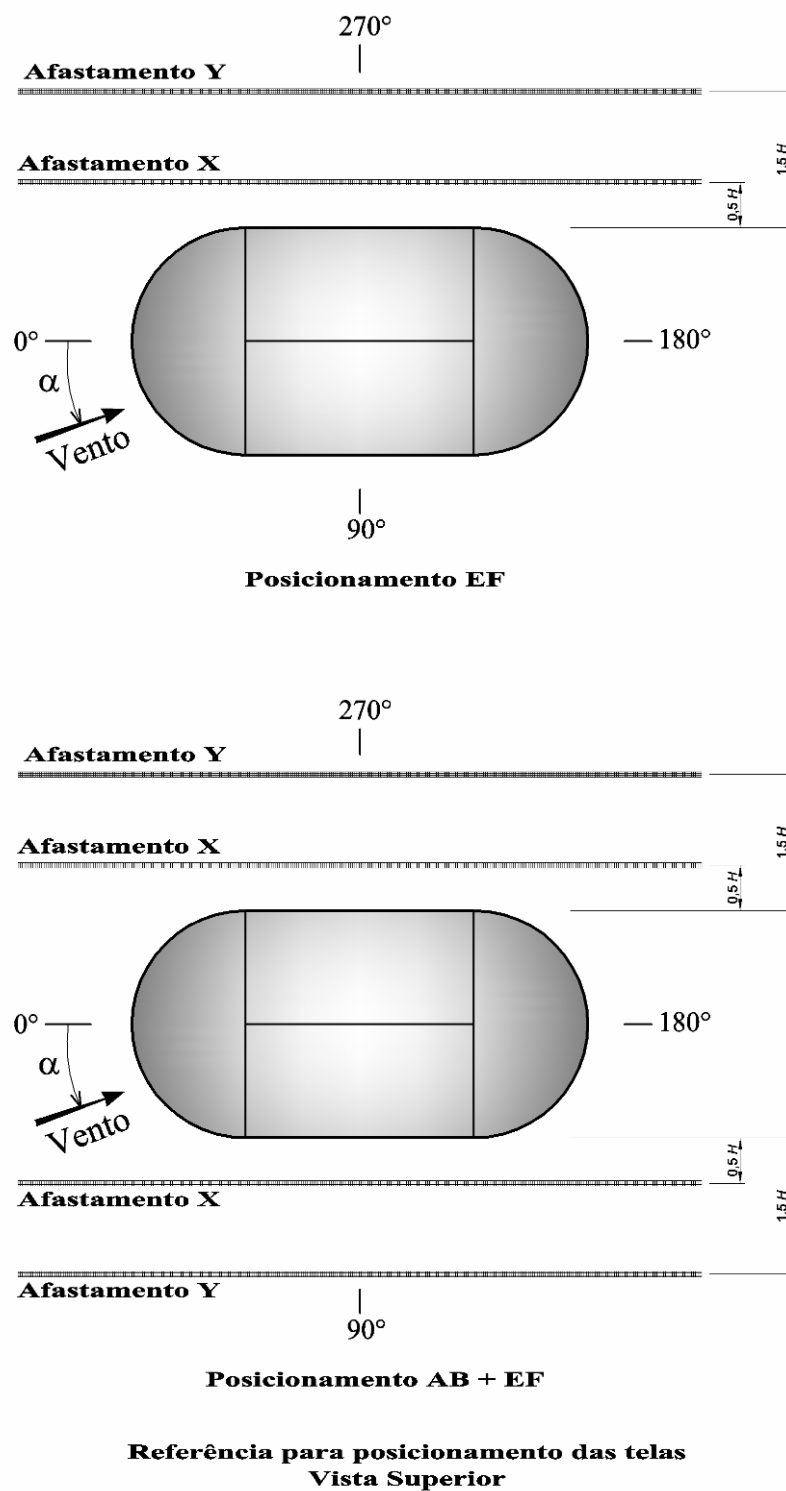
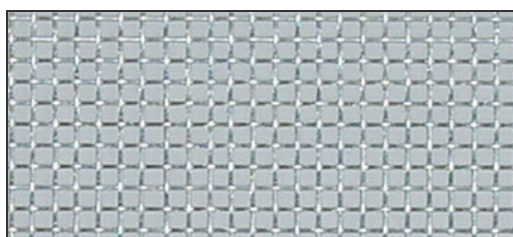
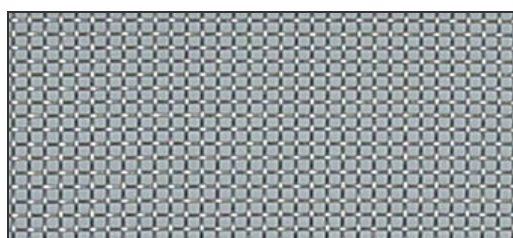


Figura 3.11 – Configurações dos ensaios com uma tela a sotavento e com duas telas (a barlavento e a sotavento).



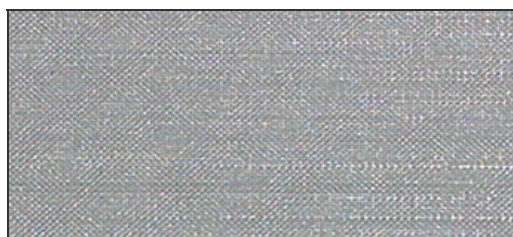
Tela K, Porosidade 68%



Tela L, Porosidade 53%



Tela M, Porosidade 37%, fio 0,2 mm.



Tela N, Porosidade 37%, fio 0,1 mm.



Tela O, Porosidade 0%

Figura 3.12 – Imagem das malhas utilizadas na confecção das telas.

Nas tabelas 3.3 a 3.6 estão listadas as diferentes configurações testadas, utilizando-se a codificação citada anteriormente.

Tabela 3.3 – Configurações utilizadas nos ensaios com uma tela a barlavento (posição AB).

Configuração	Posição 1 (Barlavento)	Posição 2 (Sotavento)	Porosidade	Altura da Tela 1	Altura da Tela 2	Afastamento da Pilha
SEM TELA	----	----	100%	----	----	----
AB-KRX	AB	----	68%	1,0 H	----	0,5 H
AB-KRY	AB	----	68%	1,0 H	----	1,5 H
AB-KSX	AB	----	68%	1,5 H	----	0,5 H
AB-KSY	AB	----	68%	1,5 H	----	1,5 H
AB-LRX	AB	----	53%	1,0 H	----	0,5 H
AB-LRY	AB	----	53%	1,0 H	----	1,5 H
AB-LSX	AB	----	53%	1,5 H	----	0,5 H
AB-LSY	AB	----	53%	1,5 H	----	1,5 H
AB-MRX	AB	----	37%	1,0 H	----	0,5 H
AB-MRY	AB	----	37%	1,0 H	----	1,5 H
AB-MSX	AB	----	37%	1,5 H	----	0,5 H
AB-MSY	AB	----	37%	1,5 H	----	1,5 H
AB-NRX	AB	----	37%	1,0 H	----	0,5 H
AB-NRY	AB	----	37%	1,0 H	----	1,5 H
AB-NSX	AB	----	37%	1,5 H	----	0,5 H
AB-NSY	AB	----	37%	1,5 H	----	1,5 H
AB-ORX	AB	----	0%	1,0 H	----	0,5 H
AB-ORY	AB	----	0%	1,0 H	----	1,5 H
AB-OSX	AB	----	0%	1,5 H	----	0,5 H
AB-OSY	AB	----	0%	1,5 H	----	1,5 H

Tabela 3.4 – Configurações utilizadas nos ensaios com uma tela a barlavento (posição CD).

Configuração	Posição 1 (Barlavento)	Posição 2 (Sotavento)	Porosidade	Altura da Tela 1	Altura da Tela 2	Afastamento da Pilha
CD-KRX	CD	----	68%	1,0 H	----	0,5 H
CD-KRY	CD	----	68%	1,0 H	----	1,5 H
CD-KSX	CD	----	68%	1,5 H	----	0,5 H
CD-KSY	CD	----	68%	1,5 H	----	1,5 H
CD-LRX	CD	----	53%	1,0 H	----	0,5 H
CD-LRY	CD	----	53%	1,0 H	----	1,5 H
CD-LSX	CD	----	53%	1,5 H	----	0,5 H
CD-LSY	CD	----	53%	1,5 H	----	1,5 H
CD-MRX	CD	----	37%	1,0 H	----	0,5 H
CD-MRY	CD	----	37%	1,0 H	----	1,5 H
CD-MSX	CD	----	37%	1,5 H	----	0,5 H
CD-MSY	CD	----	37%	1,5 H	----	1,5 H
CD-NRX	CD	----	37%	1,0 H	----	0,5 H
CD-NRY	CD	----	37%	1,0 H	----	1,5 H
CD-NSX	CD	----	37%	1,5 H	----	0,5 H
CD-NSY	CD	----	37%	1,5 H	----	1,5 H
CD-ORX	CD	----	0%	1,0 H	----	0,5 H
CD-ORY	CD	----	0%	1,0 H	----	1,5 H
CD-OSX	CD	----	0%	1,5 H	----	0,5 H
CD-OSY	CD	----	0%	1,5 H	----	1,5 H

Tabela 3.5 – Configurações utilizadas nos ensaios com duas telas (a sotavento e a barlavento).

Configuração	Posição 1 (Barlavento)	Posição 2 (Sotavento)	Porosidade	Altura da Tela 1	Altura da Tela 2	Afastamento da Pilha
AB-LRX EF-LRX	AB	EF	53%	1,0 H	1,0 H	0,5 H
AB-LRY EF-LRY	AB	EF	53%	1,0 H	1,0 H	1,5 H
AB-LRX EF-LSX	AB	EF	53%	1,0 H	1,5 H	0,5 H
AB-LSX EF-LRX	AB	EF	53%	1,5 H	1,0 H	0,5 H
AB-LRY EF-LSY	AB	EF	53%	1,0 H	1,5 H	1,5 H
AB-LSY EF-LRY	AB	EF	53%	1,5 H	1,0 H	1,5 H
AB-MRX EF-MRX	AB	EF	37%	1,0 H	1,0 H	0,5 H
AB-MRY EF-MRY	AB	EF	37%	1,0 H	1,0 H	1,5 H
AB-MRX EF-MSX	AB	EF	37%	1,0 H	1,5 H	0,5 H
AB-MSX EF-MRX	AB	EF	37%	1,5 H	1,0 H	0,5 H
AB-MRY EF-MSY	AB	EF	37%	1,0 H	1,5 H	1,5 H
AB-MSY EF-MRY	AB	EF	37%	1,5 H	1,0 H	1,5 H
AB-ORX EF-ORX	AB	EF	0%	1,0 H	1,0 H	0,5 H
AB-ORY EF-ORY	AB	EF	0%	1,0 H	1,0 H	1,5 H
AB-ORX EF-OSX	AB	EF	0%	1,0 H	1,5 H	0,5 H
AB-OSX EF-ORX	AB	EF	0%	1,5 H	1,0 H	0,5 H
AB-ORY EF-OSY	AB	EF	0%	1,0 H	1,5 H	1,5 H
AB-OSY EF-ORY	AB	EF	0%	1,5 H	1,0 H	1,5 H

Tabela 3.6 – Configurações utilizadas nos ensaios com uma tela a sotavento (posição EF).

Configuração	Posição 1 (Barlavento)	Posição 2 (Sotavento)	Porosidade	Altura da Tela 1	Altura da Tela 2	Afastamento da Pilha
SEM TELA	----	----	100%	----	----	----
EF-LRX	----	EF	53%	----	1,0 H	0,5 H
EF-LRY	----	EF	53%	----	1,0 H	1,5 H
EF-LSX	----	EF	53%	----	1,5 H	0,5 H
EF-LSY	----	EF	53%	----	1,5 H	1,5 H
EF-MRX	----	EF	37%	----	1,0 H	0,5 H
EF-MRY	----	EF	37%	----	1,0 H	1,5 H
EF-MSX	----	EF	37%	----	1,5 H	0,5 H
EF-MSY	----	EF	37%	----	1,5 H	1,5 H
EF-ORX	----	EF	0%	----	1,0 H	0,5 H
EF-ORY	----	EF	0%	----	1,0 H	1,5 H
EF-OSX	----	EF	0%	----	1,5 H	0,5 H
EF-OSY	----	EF	0%	----	1,5 H	1,5 H

3.2 O Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann

O Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann (figura 3.13) se localiza no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É um túnel de vento de camada limite atmosférica, de circuito fechado, projetado na década 1970 para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos reduzidos de construção civil, além de aplicações industriais e ambientais. A velocidade máxima do escoamento do ar dentro do túnel com vento uniforme e sem modelos é de aproximadamente 150 km/h, gerada por um ventilador com hélices de 1,5 m de diâmetro acionado por um motor elétrico de 100 HP. A velocidade do escoamento foi controlada manualmente pela movimentação de aletas metálicas radiais que obstruem a passagem do ar.

O túnel possui 21,38 m de comprimento total, com uma seção de testes principal de dimensões aproximadas 1,30 m (largura) \times 0,90 m (altura) \times 9,36 m (comprimento) e relação comprimento/altura igual a 10,3. Essa seção é ligeiramente divergente na direção do escoamento, tendo uma largura a barlavento de 1,20 m. O túnel possui quatro mesas giratórias para fixação de modelos, sendo que a mesa M-II é a mais usualmente utilizada. Pode-se ver na figura 3.14 a configuração geral em planta do túnel de vento.



Figura 3.13 – Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann.

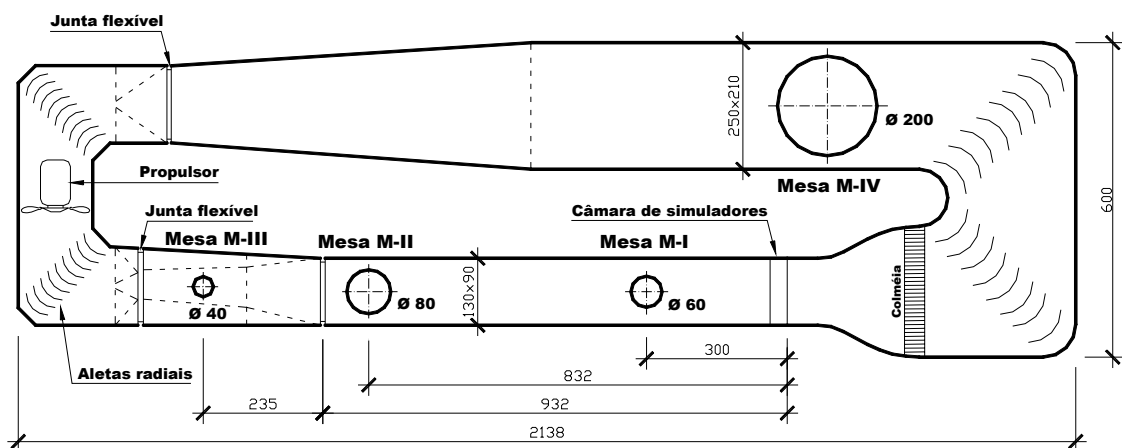


Figura 3.14 – Desenho esquemático da vista superior do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (dimensões em cm).

Segundo Blessmann (1982), a seção principal de testes foi escolhida de forma a permitir o estudo de modelos alongados de seção transversal retangular com uma relação profundidade/altura de aproximadamente 1,5. Para estudos de poluição atmosférica e modelagem de grandes áreas de cidades ou campos em uma escala adequada, deve ser considerada a área do retorno do circuito, que tem uma seção transversal de 2,51 m de comprimento e 2,12 m de altura. Recentemente foram feitas modificações no túnel de vento para permitir a utilização da mesa de testes M-IV, localizada no retorno do túnel, para este tipo de simulações.

Para permitir a modelagem realística da camada limite atmosférica através do desenvolvimento pleno de uma camada cisalhante em pequenas distâncias, o túnel de vento está apto a receber três dispositivos para simulação da camada limite atmosférica: bloqueio da entrada da seção de testes, cobertura do piso do túnel com superfícies de diferentes rugosidades e jatos de ar orientados perpendicularmente ou obliquamente ao escoamento de ar. Esses três dispositivos podem ser utilizados de forma independente ou combinados (Blessmann, 1982). Um maior detalhamento sobre os processos de simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento é fornecido em Loredo-Souza *et al* (2004).

3.3 Características do vento simulado

Para este estudo foi simulado um vento com um perfil de velocidades médias semelhante aos perfis de velocidades médias de ventos que se desenvolvem sobre terrenos com rugosidades entre as categorias III e IV da NBR 6123 – Forças devidas ao Vento em Edificações (1988). As características destas categorias são as seguintes:

Categoria III – terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3m. São exemplos desse tipo de terreno:

- 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.

Categoria IV – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V. São exemplos desse tipo de terreno:

- 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.

As principais características do vento simulado estão representadas na figura 3.15, onde se pode ver o perfil vertical das velocidades médias, em porcentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva teórica), intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência.

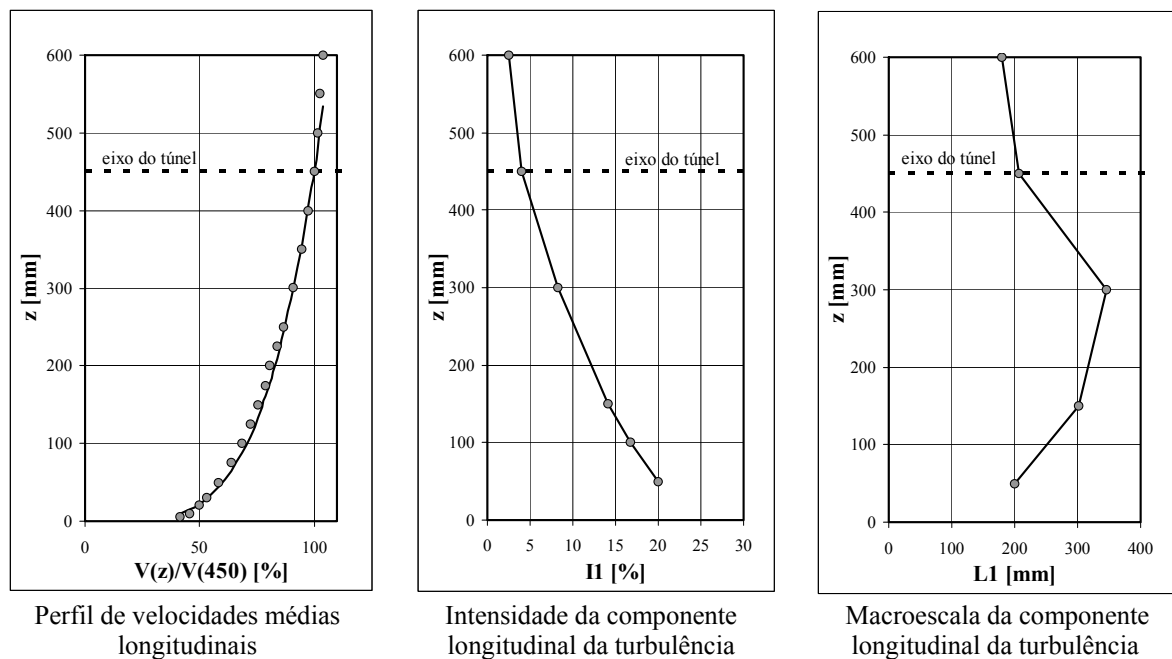


Figura 3.15 – Características do vento simulado (expoente $p = 0,23$).

O perfil das velocidades médias da figura 3.15 pode ser expresso, aproximadamente, pela seguinte lei de potência:

$$\frac{\bar{V}(x_3)}{\bar{V}_{ref}} = \left(\frac{x_3}{x_{ref}} \right)^p, \quad (3.1)$$

onde $\bar{V}(x_3)$ é a velocidade média do vento na altura x_3 , \bar{V}_{ref} é a velocidade média em uma altura de referência $x_{ref} = 450$ mm dentro do túnel (equivalente à cota do eixo longitudinal do túnel) e p um expoente igual a 0,23. Quando colocada em escala *log-log*, a Equação 3.1 representa uma reta de declividade p , que descreve bem a camada limite atmosférica com exceção da região muito próxima à superfície.

Adicionalmente foram utilizados agulhas, placas perfuradas e elementos de rugosidade superficial (figura 3.16) com o objetivo de acelerar artificialmente a formação do perfil de velocidades, em virtude de não haver comprimento suficiente no túnel para o desenvolvimento natural do perfil de velocidades. Como elementos de rugosidade foram utilizados blocos de madeira de dimensões 20 mm × 30 mm × 20 mm (comprimento, altura, largura) dispostos com espaçamento longitudinal e transversal de 90 mm ao longo da câmara de ensaio. Maiores informações podem ser encontradas em LOREDO-SOUZA *et al* (2004c).

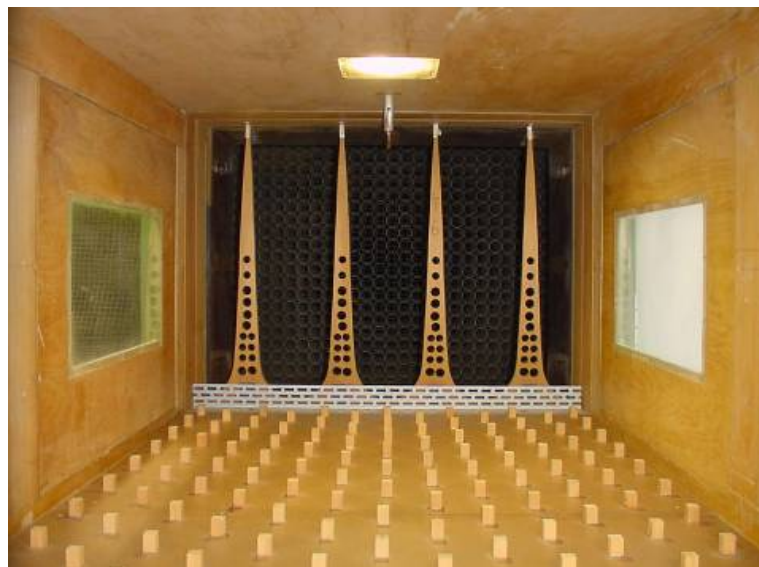


Figura 3.16 – Vista interna do túnel de vento mostrando os elementos simuladores.

3.4 Medição das pressões na superfície da pilha

Foram medidas as pressões médias e flutuantes, devidas ao vento, na superfície da pilha simulada. A metodologia de cálculo e a forma de apresentação dos resultados são descritas a seguir.

3.4.1 Considerações Gerais

As flutuações das pressões atuantes na superfície das pilhas de carvão são devidas tanto às rajadas presentes no vento natural (turbulência atmosférica), quanto ao caráter flutuante da esteira gerada pela própria pilha. Valores extremos de sucções ou sobrepressões instantâneas, em um período de uma hora, podem ser consideravelmente maiores do que as correspondentes pressões médias para esse mesmo período.

As pressões locais esperadas, relevantes à determinação das forças de pressão, podem ser determinadas através da combinação dos coeficientes aerodinâmicos medidos em ensaios em túnel de vento com a estatística do vento na região estudada.

Não há total consenso, dentro do atual estado da arte da engenharia do vento, quanto a qual procedimento para determinação das pressões locais é o mais significativo para a determinação das forças locais de pressão. Uma das alternativas consiste em utilizar valores médios dos coeficientes de pressão combinados com pressões dinâmicas de pico. A pressão de pico, p_0 , é dada por:

$$p_0 = \tilde{q} \bar{c}_p \quad (3.2)$$

sendo \tilde{q} a pressão dinâmica de referência, correspondente à velocidade média de referência, um intervalo de aproximadamente três segundos (medida a uma altura equivalente a $16 m$, em escala real, para o caso da pilha de carvão típica) e \bar{c}_p o coeficiente de pressão médio (média temporal, medido no túnel de vento).

3.4.2 Coeficientes Aerodinâmicos

A partir dos registros das séries temporais das pressões devidas ao vento, foram calculados os coeficientes de pressão média, definidos pela relação

$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}{q} \quad (3.3)$$

Além disso, calculou-se o *rms* (*root mean square*) da flutuação do coeficiente de pressão na superfície do modelo, que é definido pela relação

$$\tilde{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q} \quad (3.4)$$

Nestas equações, $p(t)$ é a pressão instantânea, na superfície da pilha, medida em relação à pressão estática de referência em um determinado instante t , \bar{p} representa o valor médio de $p(t)$ para o intervalo de tempo de amostragem T . A pressão dinâmica de referência q pode ser expressa pela igualdade

$$q = \frac{1}{2} \rho U^2, \quad (3.5)$$

onde ρ é a massa específica do ar e U representa a velocidade média de referência, medida no topo da pilha, a uma altura equivalente a $16 m$, em escala real.

Neste trabalho, adotou-se convenção na qual os coeficientes de pressão positivos indicam a atuação de sobrepressão no modelo e os coeficientes de pressão negativos indicam a atuação de sucção.

As medições das pressões foram realizadas tanto por transdutores elétricos de pressão quanto por multimanômetros a álcool. A figura 3.17 mostra uma fotografia do equipamento utilizado na medição de pressões instantâneas (transdutores) e a figura 3.18 mostra uma fotografia típica de um ensaio com multimanômetro.

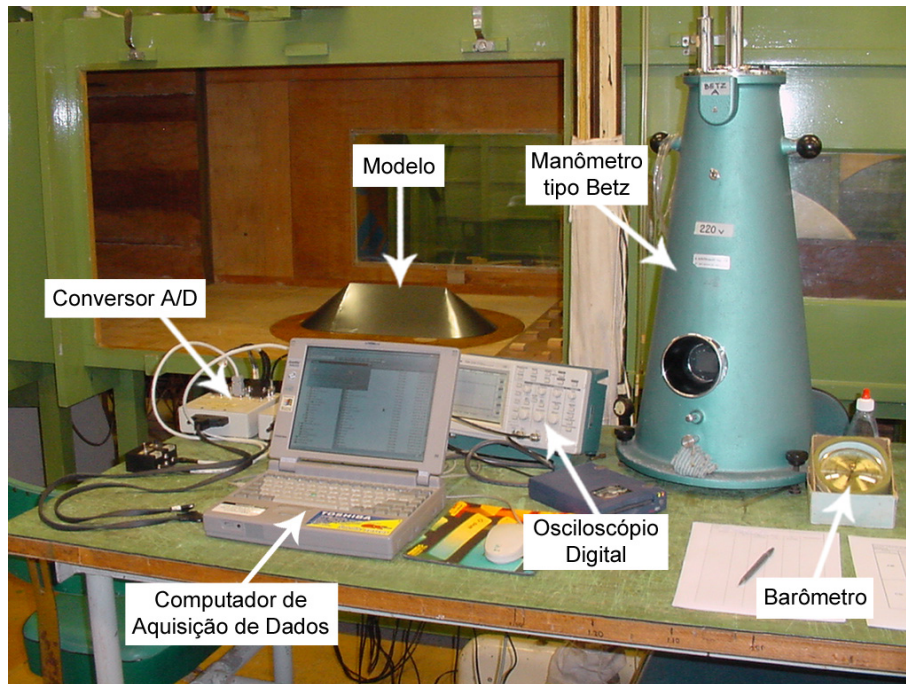


Figura 3.17 – Sistema de medição de pressões com transdutores elétricos.

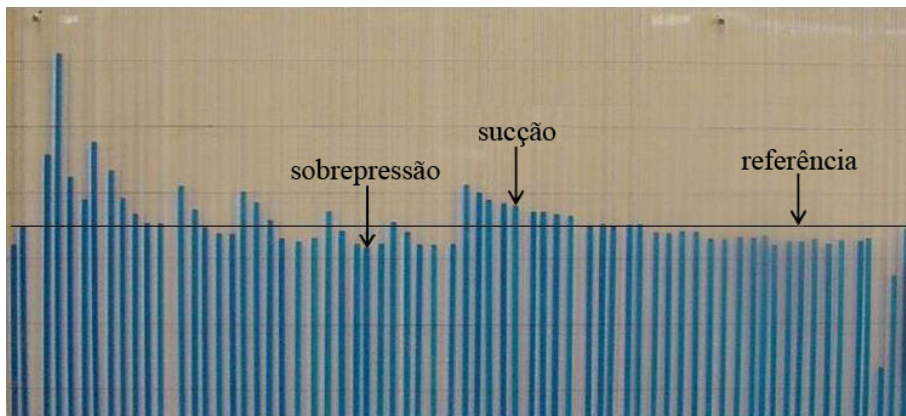


Figura 3.18 – Fotografia de um ensaio típico com multimanômetro.

A pressão dinâmica q em uma determinada altura x_3 pode ser medida indiretamente através da diferença de pressão Δp_A entre dois anéis piezométricos localizados no convergente do túnel de vento, corrigida por uma constante experimental k_0 . Assim, temos que

$$q = k_0 \Delta p_A . \quad (3.5)$$

A massa específica ρ do ar é função da temperatura T e da pressão atmosférica p_{atm} . A pressão atmosférica foi controlada através de um barômetro com escala em milímetros de mercúrio, com pressão máxima de trabalho de 800 mmHg e resolução de 2 mmHg. Paralelamente, a temperatura T do escoamento foi monitorada por um termômetro digital de contato Testo modelo 915, com resolução 0,1°C e tempo de resposta de 10 s, com a haste posicionada na parede lateral do túnel de vento, a barlavento da seção de testes. A massa específica ρ do ar pode ser determinada através da Lei dos Gases Perfeitos para a faixa de temperaturas entre 160 e 2.200 K pois, segundo White (1999), neste intervalo o ar pode ser considerado uma substância pura. Dessa maneira, a equação homogênea da massa específica do ar é

$$\rho = \frac{p_{\text{atm}}}{R_{\text{ar}} T_K}, \quad (3.6)$$

sendo p_{atm} a pressão atmosférica, T_K a temperatura e R_{ar} a constante do gás, que é função do peso molecular do gás e vale 287 m²/(s² . K).

A diferença de pressão entre os anéis do convergente foi controlada, adicionalmente, através de um manômetro do tipo Betz, de forma a monitorar a estabilização e o módulo da velocidade do escoamento dentro da câmara de ensaios. Um manômetro tipo Betz é um micromanômetro diferencial de coluna de água, e um desenho esquemático pode ser observado na figura 3.19.

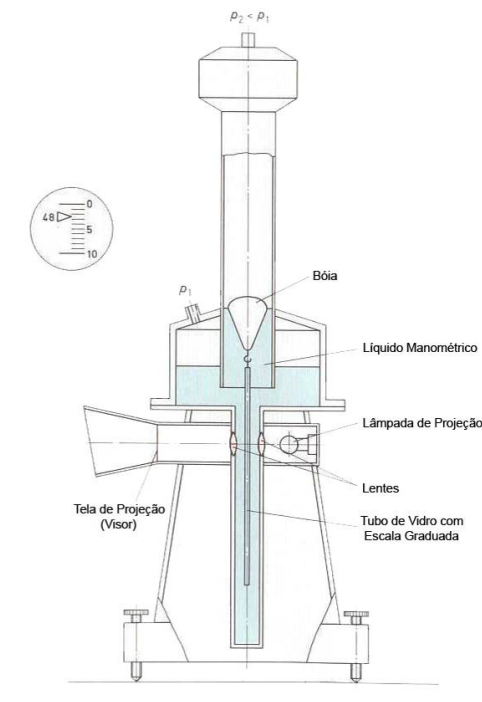


Figura 3.19 – Esquema de um manômetro tipo Betz.
Fonte: DEUHLAND (2006).

3.5 Medição das Velocidades do Vento

As velocidades em pontos selecionados sobre a superfície do modelo foram medidas através de um sistema de anemometria com sensores de fio quente. O sensor foi montado em um sistema de posicionamento com controle externo (figura 3.20) para obter medidas da velocidade do vento em diferentes pontos na região da pilha.

Medições de velocidades instantâneas ($U(z)$) do vento foram realizadas em diversas posições verticais localizadas na região da pilha. A partir destas, foram calculadas as velocidades médias temporais, $\bar{U}(z)$, e as flutuações de velocidade, $u(z) = U(z) - \bar{U}(z)$. Como variável representativa das flutuações de velocidade, foi utilizado o valor *rms* (*root mean square*) da flutuação de velocidade ($u'(z)$). As duas grandezas, média e *rms*, foram normalizadas com a velocidade média no topo da pilha (U_{ref}):

$$\bar{U}_{ad}(z) = \bar{U}(z) / U_{ref} \quad (3.7)$$

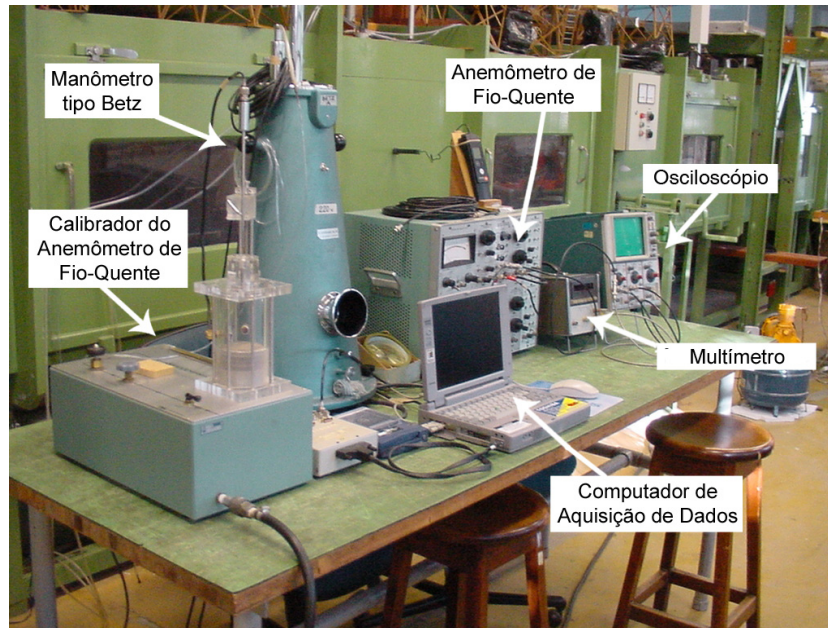


Figura 3.20 – Sistema de medição de velocidades instantâneas.

$$I(z) = u'(z)/U_{ref}, \quad (3.8)$$

sendo $u'(z)$ o valor *rms* ou desvio padrão das flutuações da velocidade do vento na direção do escoamento principal, em um ponto de cota z e U_{ref} a velocidade média de referência do vento, na direção do escoamento principal, ao nível do topo da pilha (16 m em escala real).

O anemômetro de fio-quente é um equipamento utilizado para medições das velocidades instantâneas do vento. A partir destas medições, é possível o cálculo da velocidade média do escoamento, o valor *rms*, intensidade de turbulência, macroescala da turbulência e espectro do vento simulado.

O elemento sensível ao escoamento consiste em um fio metálico de 5 μm de diâmetro de tungstênio revestido por platina, aquecido eletricamente e mantido a uma temperatura constante pelo equipamento. Este fio responde às propriedades termodinâmicas do fluido. As transferências de calor entre o fio-quente e o fluido provocam um resfriamento do fio e a diminuição de sua resistência. O equipamento é sensível a esta variação e aplica uma nova tensão com o objetivo de aumentar a corrente que passa pelo fio (que tem a função de um resistor) de modo que a temperatura retorne ao valor inicial. Com o auxílio de

uma curva de calibração pode-se obter a informação da velocidade do escoamento a partir desta nova tensão aplicada (VENNAERD e STREET, 1978).

O principal mecanismo responsável pela manutenção da temperatura constante do filamento é um circuito elétrico denominado ponte de *Wheatstone*, cujo braço ativo é a sonda de fio-quente. Neste circuito há uma fonte de tensão e um servo-amplificador responsável pela manutenção da resistência do fio, e conseqüentemente sua temperatura, frente à passagem do escoamento. Um esquema de funcionamento é mostrado na figura 3.21.

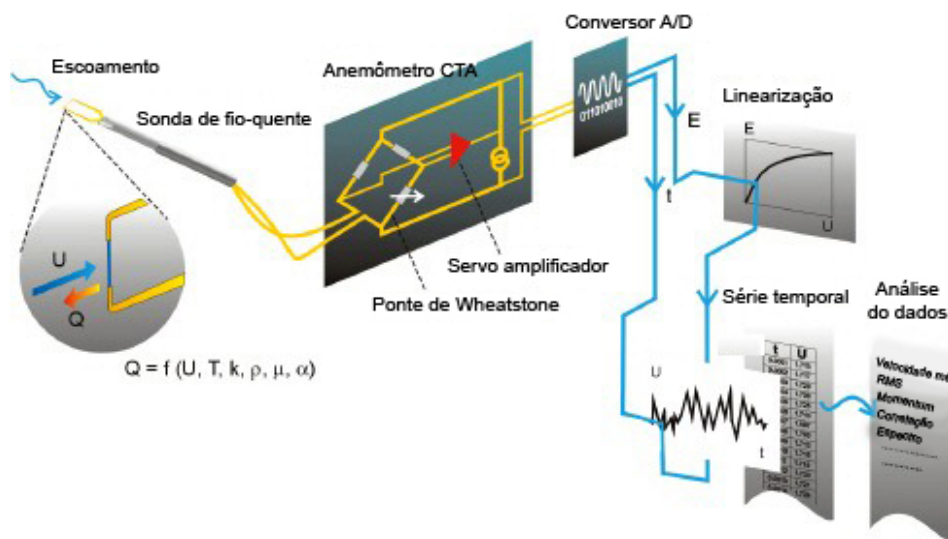


Figura 3.21 - Esquema de funcionamento de um anemômetro de fio-quente (DANTEC, 2006).

3.6 Visualização do Escoamento

Existem diversas técnicas de visualização do escoamento. Entretanto, a presença da turbulência do escoamento incidente, bem como aquela gerada pela própria pilha e telas de proteção, torna o processo de visualização mais complexo do que seria em relação a escoamentos laminares. Neste trabalho foram empregadas duas técnicas de visualização, a técnica de injeção de fumaça a barlavento e a técnica de visualização através de hastes flexíveis. A primeira, como o próprio nome diz, consiste em injetar a barlavento do modelo fumaça distribuída através de uma torre com pequenos orifícios. A técnica de visualização através de hastes flexíveis consiste em inserir manualmente no escoamento uma haste metálica contendo um fio de lã na ponta, de forma a visualizar as mudanças de direção do escoamento em cada ponto selecionado. Fotografias correspondentes às técnicas utilizadas são apresentadas no Capítulo 4.

Capítulo 4 – Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados. Estes resultados incluem o levantamento de perfis de velocidades verticais e perfis de intensidade de turbulência, medição das velocidades tangenciais na seção transversal da pilha e análise dos coeficientes de pressão média e *rms* da flutuação dos coeficientes de pressão.

4.1 Análise dos resultados referentes às velocidades

4.1.1 Perfis verticais de velocidades

Foram medidos perfis de velocidades verticais e de valores na região da pilha através de um anemômetro de fio quente. As configurações utilizadas correspondem aos casos “SEM TELA”, AB-KRY, AB-LRY e AB-MRY. Pode-se visualizar na figura 4.1 a localização dos perfis medidos. Nas figuras 4.2 a 4.4 são apresentados os perfis de velocidades médias adimensionais e dos valores *rms* das flutuações de velocidade adimensionais, em função da cota adimensional z/H , medida desde a base da pilha.

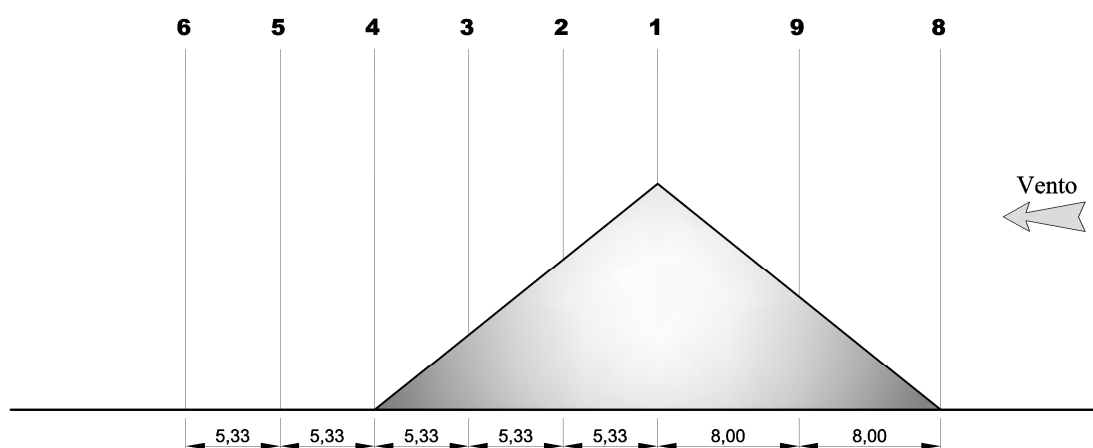
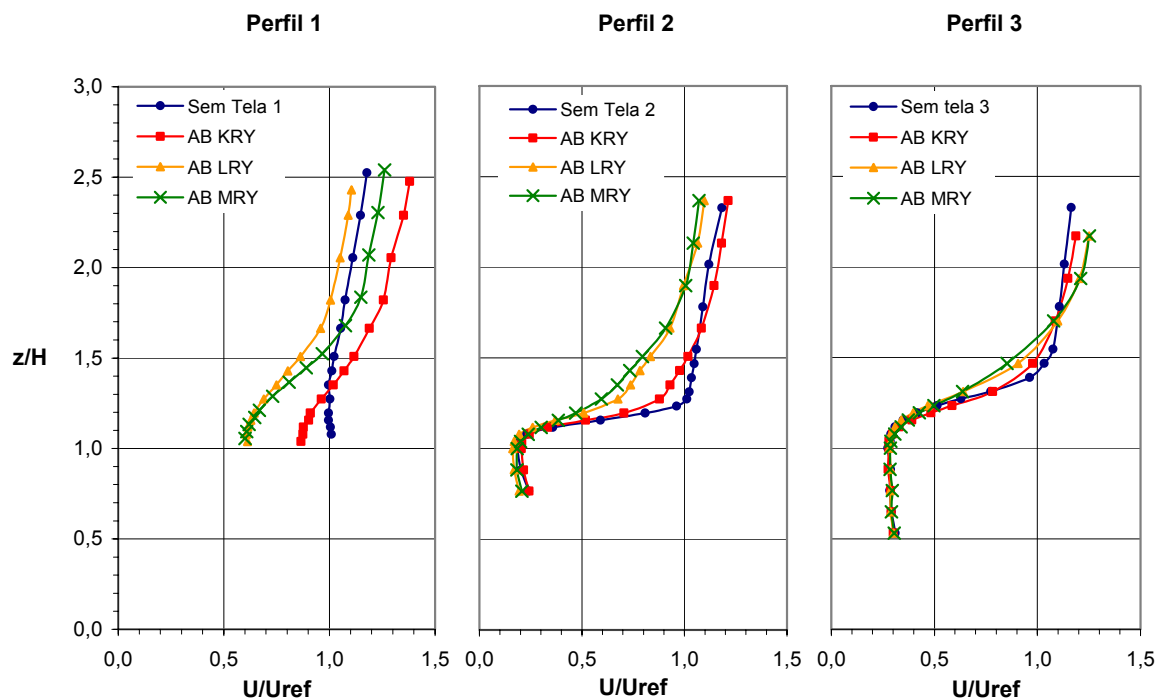
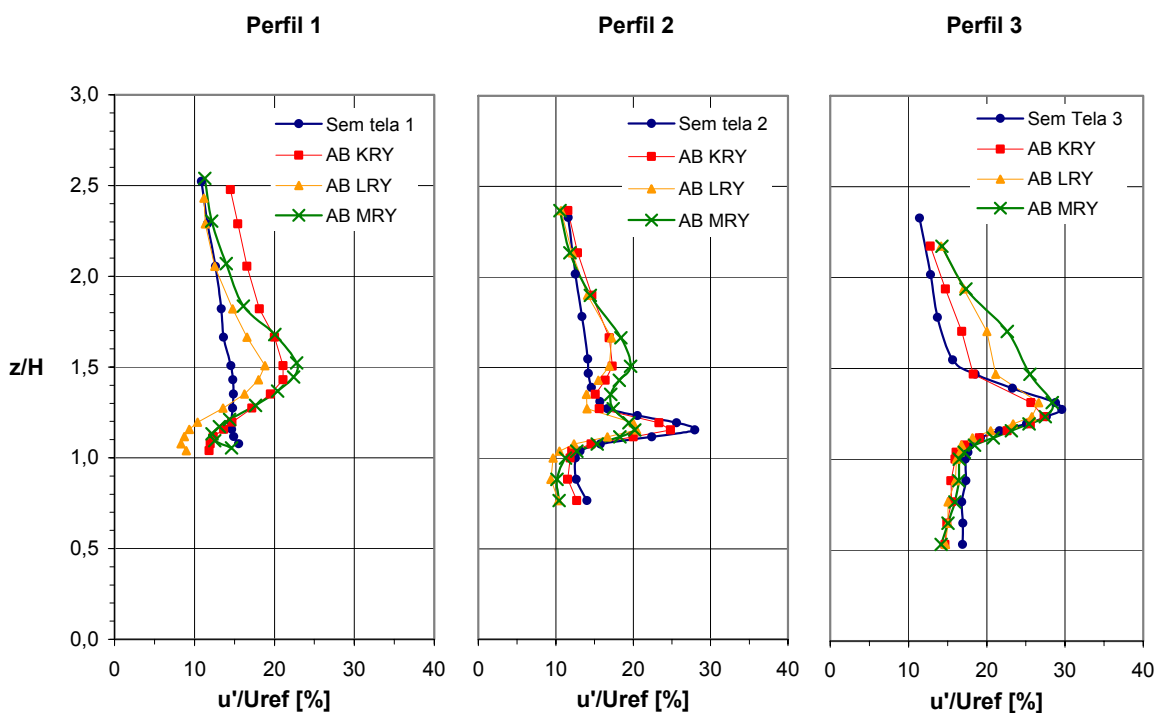


Figura 4.1 – Localização dos perfis verticais de velocidades (dimensões em cm).

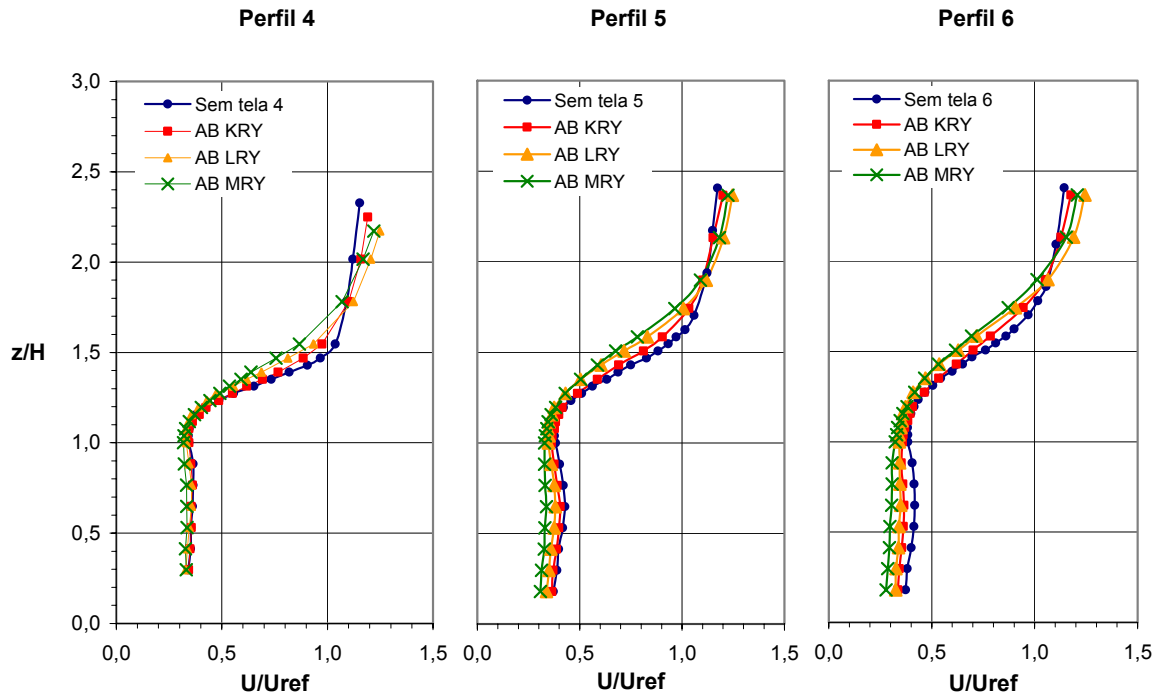


Perfis verticais das velocidades médias adimensionais.

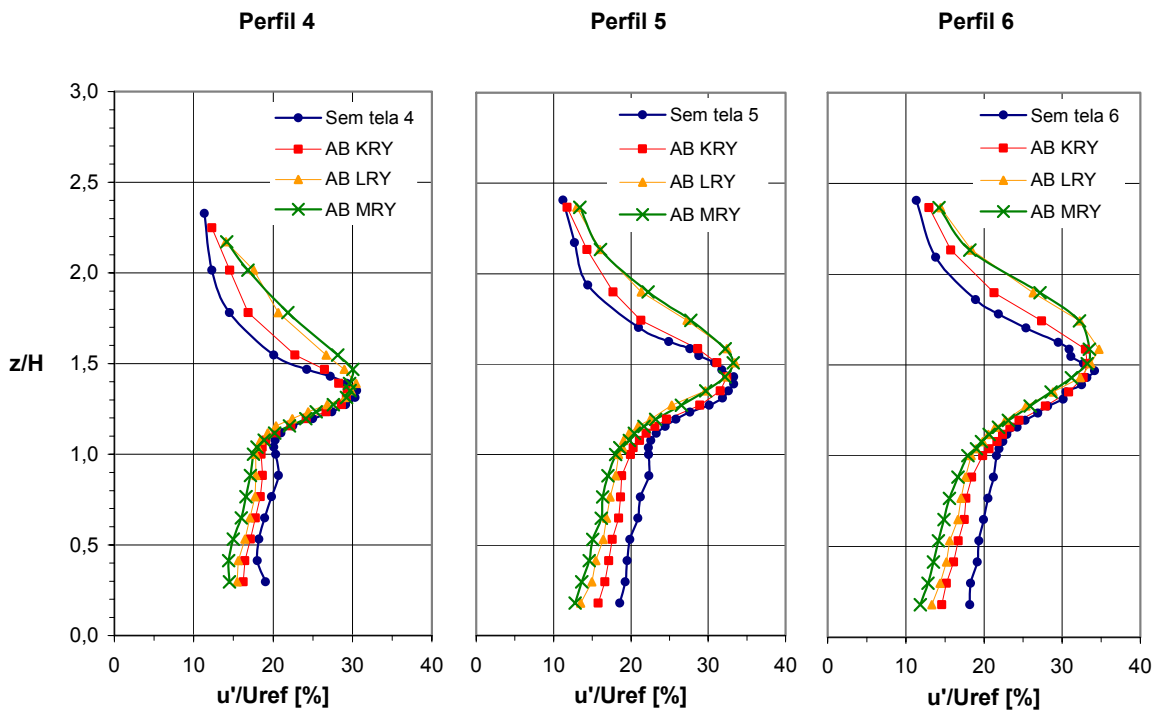


Perfis verticais das intensidades da turbulência adimensionais.

Figura 4.2 – Resultados dos perfis 1 a 3.

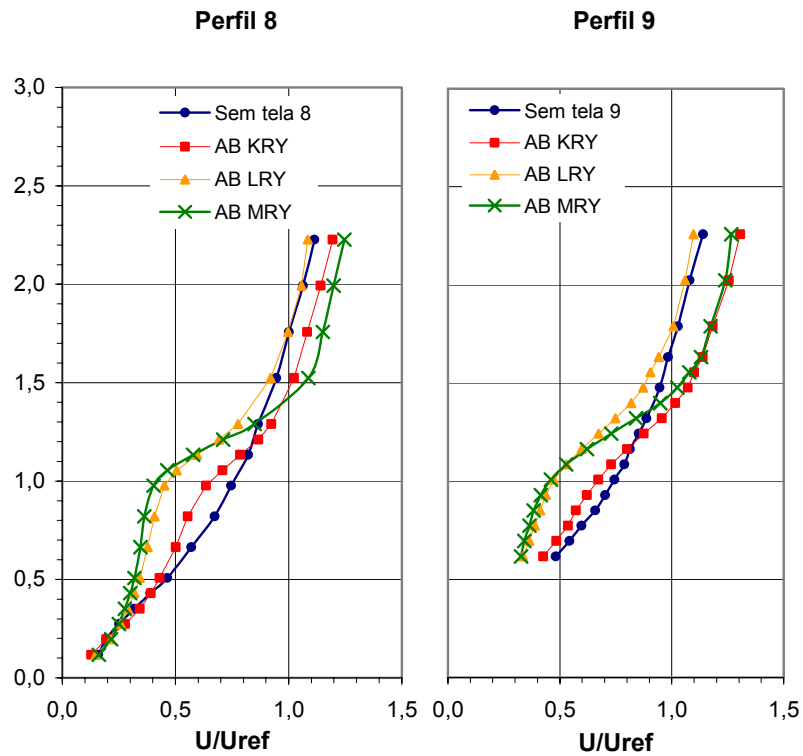


Perfis verticais das velocidades médias adimensionais.

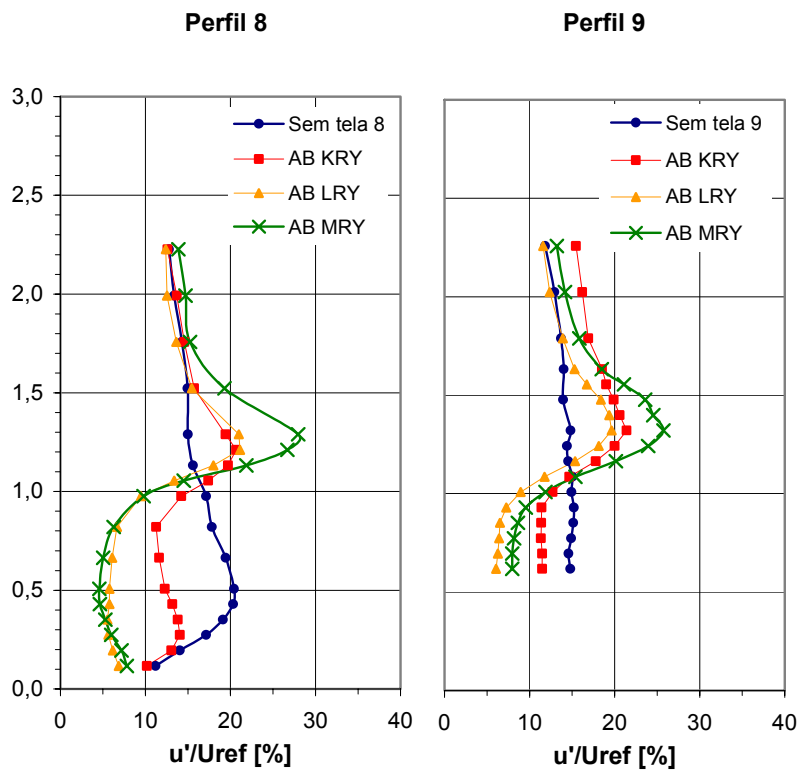


Perfis verticais das intensidades da turbulência adimensionais.

Figura 4.3 – Resultados dos perfis 4 a 6.



Perfis verticais das velocidades médias adimensionais.



Perfis verticais das intensidades da turbulência adimensionais.

Figura 4.4 – Resultados dos perfis 8 e 9.

Com a finalidade de ilustrar os resultados obtidos, foram desenhadas velocidades médias negativas nos perfis de velocidades médias em torno da pilha, no sentido contrário ao do vetor direção do escoamento. Esta aproximação, devida à presença de uma grande região de recirculação a sotavento da pilha, foi realizada a partir das visualizações. A presença de pontos de separação nos escoamentos devidos a arestas de contornos sólidos gera regiões de recirculação que o método de anemometria de fio quente não consegue captar. Os limites de velocidades positivas e negativas são, dessa forma, ilustrativos.

O perfil 1 está localizado no topo da pilha. Nesse ponto, a tela AB KRY reduziu a velocidade do escoamento na região próxima à pilha (até 1,3H). Acima dessa cota, houve uma aceleração do escoamento. A intensidade de turbulência foi reduzida na região próxima ao topo (até 1,2H), ocorrendo acima desse ponto um acréscimo considerável. A tela AB LRY reduziu visivelmente as velocidades em todos os pontos medidos no perfil 1, tendo especial efeito até a cota 2,0H. A intensidade de turbulência foi reduzida até 1,3H e se manteve inalterada acima de 2,0H, sendo que neste intervalo (1,3H e 2,0H) houve um acréscimo. A tela AB MRY ocasionou grandes reduções de velocidades até a cota 1,6H. Acima disso, houve um pequeno acréscimo de velocidades. A intensidade de turbulência no perfil 1 aumentou com a colocação desta tela, com exceção de um pequeno trecho entre 1,1H e 1,2H, onde ocorreu uma pequena redução.

Quanto aos perfis 8 e 9, localizados a barlavento da pilha, verifica-se que a tela AB KRY não alterou significativamente as medições de velocidades, ao contrário da tela AB LRY, que ocasionou reduções significativas até a cota 1,5H. Houve uma redução da intensidade de turbulência até a altura H com a presença da tela AB KRY, aumentando acima dessa cota. A tela AB LRY reduziu bastante a intensidade de turbulência até 1,1H. No trecho entre 1,1H e 1,7H aumentou muito, sendo que acima disso a intensidade de turbulência permaneceu inalterada. A tela AB MRY reduziu as velocidades até 1,3H. Acima dessa cota, acelerou o escoamento. A presença dessa tela reduziu bastante a intensidade de turbulência até a altura da pilha (1H), aumentando acima desta cota.

A sotavento (perfis 2 a 6), a presença da tela AB KRY não alterou significativamente as velocidades do escoamento, ocasionando uma suave redução da intensidade de turbulência até a altura da pilha (1H) e um pequeno aumento acima desse ponto. A tela AB LRY reduziu um pouco as velocidades acima de 1,2H, com exceção do perfil 6, onde ocorre uma aceleração acima da cota 2H. A sua presença reduz a intensidade de turbulência até a cota 1,4H, ocorrendo um pequeno acréscimo acima desse ponto. A tela AB MRY

reduziu as velocidades desde o solo até a altura $2H$, sendo que esse efeito foi maior no trecho entre H e $2H$. Acima, ocorreu uma pequena aceleração do escoamento. A intensidade de turbulência foi reduzida até a altura $1,3H$, aumentando a partir deste ponto.

4.1.2 Velocidades Tangenciais

Na seção transversal da pilha foram medidas as velocidades tangenciais (vetor velocidade paralelo à face da pilha) a uma altura correspondente a $0,29$ m em escala real, para vento incidindo perpendicularmente ao maior eixo geométrico da pilha. A referência para identificação dos pontos de medição é mostrada na figura 4.5.

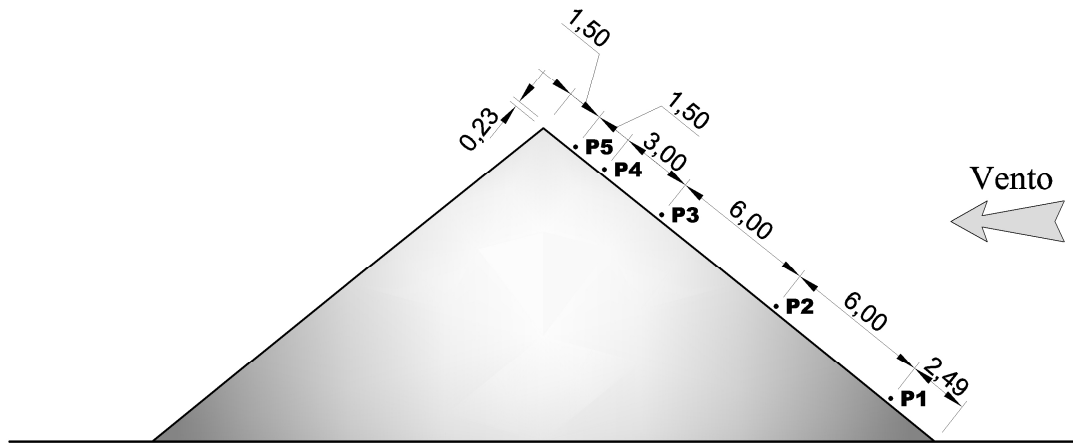


Figura 4.5 – Posicionamento dos pontos de medição na face a barlavento da pilha (dimensões em cm).

A partir dos registros de velocidades foram calculados os coeficientes de velocidade para a velocidade média (C_v) e os coeficientes de velocidade para a flutuação de velocidade (C'_v), definidos pelas relações

$$C_v = \frac{\bar{U}}{U_{ref}} \quad (4.1)$$

e

$$C'_v = \frac{u'}{U_{ref}} \quad (4.2)$$

sendo \bar{U} a velocidade média do vento no ponto de estudo, na direção paralela à superfície da pilha, a uma altura correspondente a $0,29\text{ m}$ em escala real, u' o valor *rms* ou desvio padrão das flutuações da velocidade do vento, na direção paralela à superfície da pilha, também a uma altura correspondente a $0,29\text{ m}$ em escala real, e U_{ref} a velocidade média de referência medida a uma altura de 16 m em escala real, correspondente ao topo da pilha de carvão.

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores de C_v e C'_v em função do tipo de tela. Para facilitar o entendimento, as figuras 4.6 e 4.7 apresentam visualmente os mesmos dados.

Tabela 4.1 – Coeficientes de velocidades médias (C_v).

Ponto	Permeabilidade			
	Sem Tela	K (68%)	L (53%)	M (37%)
1	0,163	0,127	0,152	0,163
2	0,375	0,305	0,297	0,27
3	0,611	0,492	0,426	0,34
4	0,691	0,571	0,485	0,375
5	0,775	0,644	0,544	0,419

Tabela 4.2 – Coeficientes dos valores *rms* das flutuações de velocidade (C'_v).

Ponto	Permeabilidade			
	Sem Tela	K (68%)	L (53%)	M (37%)
1	0,095	0,071	0,07	0,063
2	0,151	0,111	0,076	0,073
3	0,135	0,104	0,09	0,109
4	0,13	0,103	0,107	0,133
5	0,129	0,103	0,114	0,15

Nos pontos 3 a 5 ocorreu uma redução média das velocidades tangenciais da ordem de 18% para a tela AB KRY, 30% para a tela AB LRY e 45% para a tela AB MRY. A presença da tela AB KRY ocasionou uma redução 18,7% na velocidade tangencial do ponto 2, enquanto que as telas AB LRY e AB MRY reduziram em 20,8% e 28,0%, respectivamente. O ponto 1 teve um comportamento diferenciado se comparado aos outros pontos medidos. Nesse ponto, a velocidade medida com a tela AB KRY foi 22,1% menor

que o caso Sem Tela, enquanto que a tela AB LRY reduziu apenas 6,7%, e a tela MRY manteve inalterada a velocidade tangencial.

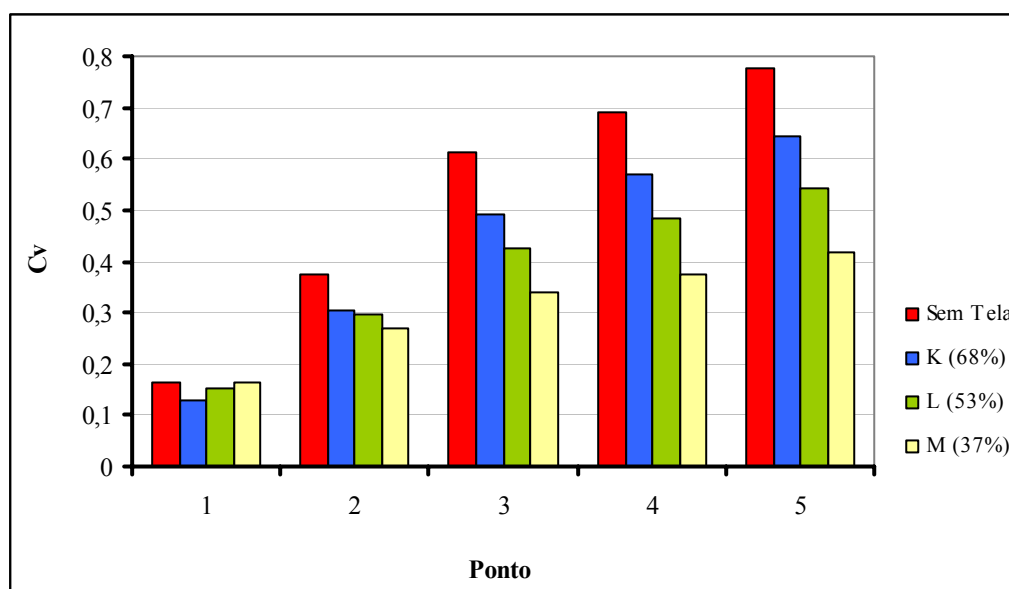


Figura 4.6 – Coeficientes de velocidades médias (C_v).

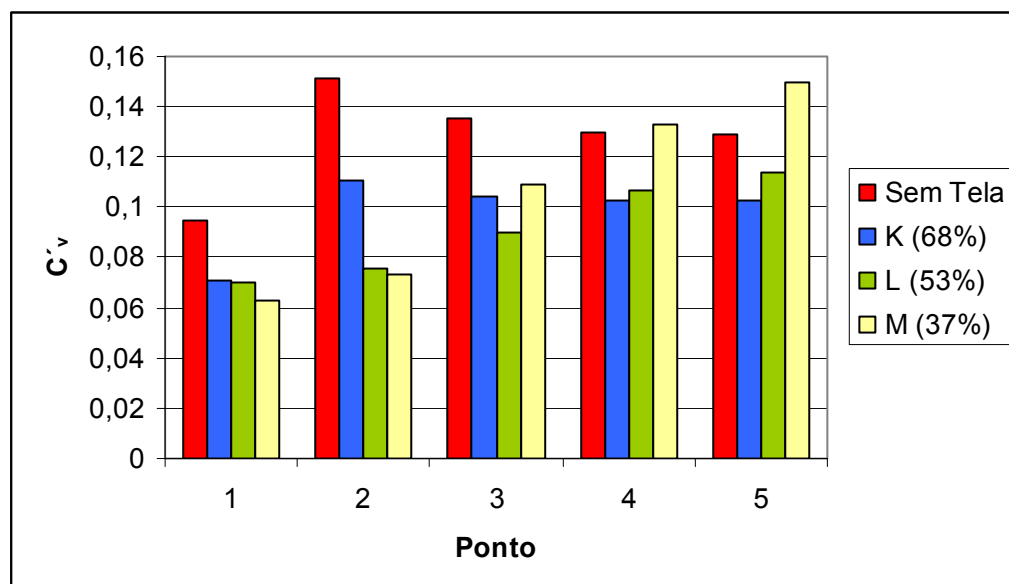


Figura 4.7 – Coeficientes dos valores *rms* das flutuações de velocidade ($C'v$).

Quanto à intensidade de turbulência, na tela AB KRY observou-se reduções na faixa de 20,2% a 26,5%. O mesmo fenômeno ocorreu com a tela AB LRY, porém com uma distribuição diferente. O ponto 2 teve uma redução de 49,7% na intensidade de turbulência, enquanto que os pontos 4 e 5 (mais próximos ao topo da pilha) tiveram uma redução percentualmente menor (11,7% e 17,6%, respectivamente). No ponto 3 reduziu-se 33,3% a intensidade de turbulência. A tela AB MRY teve um comportamento um pouco diferenciado, ocorrendo um aumento da intensidade de turbulência nos pontos próximos ao topo (2,3% no ponto 4 e 16,3% no ponto 5). Nos pontos 3 e 1 houve redução (19,3% e 33,7%, respectivamente), e o ponto 2 teve uma redução de 51,7%, da mesma ordem da tela AB LRY.

4.2 Análise dos resultados referentes às pressões

Foram medidas as pressões atuantes em 62 pontos localizados em um quadrante do modelo, e estimadas as pressões atuantes nos outros três quadrantes por simetria. Os perfis de coeficientes de pressão em uma seção transversal no meio da pilha são mostrados no Anexo B. Com a presença das telas, a configuração do escoamento não se modifica substancialmente. Porém, os valores de pressão na seção transversal da pilha apresentam variações, entre os diferentes casos, bastante significativas.

Com a tela posicionada a barlavento da pilha, nas posições AB e CD, foram feitos ensaios com cinco porosidades distintas da malha (K, L, M, N e O). Nessa situação, a placa sólida (tela O) aumentou consideravelmente, nas configurações estudadas, os níveis de sucções a sotavento da pilha nas duas configurações, o que ocorre também a barlavento da configuração CD. A exceção ocorreu na configuração AB ORY, onde ocorreu um leve decréscimo das sucções na região a sotavento até 0,5H. No caso AB, a barlavento cria-se uma região de altas sucções ocorrendo, inclusive, uma inversão dos esforços do vento (com exceção da região muito próxima ao topo, onde já ocorriam sucções). A intensidade da turbulência também aumentou com o uso desta tela, especialmente na região próximo ao topo da pilha. A exceção foi no trecho que vai do chão até uma altura próxima a 0,5H, onde se verificou uma redução da intensidade da turbulência com a presença da tela na posição CD.

Na posição CD, as telas K, L, M e N aumentaram os valores das pressões atuantes, tanto a barlavento como a sotavento, sendo que quanto menor a porosidade, maior foi o valor do acréscimo. O menor acréscimo de sucções em relação ao caso SEM TELA ocorreu na posição RY. A intensidade de turbulência nesses casos sofreu um acréscimo, principalmente na região mais próxima ao topo da pilha. Tanto em termos de coeficientes de pressão como em termos de intensidade de turbulência, os valores foram inferiores ao caso da tela O.

Na posição AB, as telas K, L, M e N aumentaram ligeiramente os valores das pressões atuantes a sotavento, principalmente próximo ao topo da pilha. Nesta região, houve uma redução da intensidade da turbulência, com exceção das configurações AB NRY e AB MRY. A barlavento, a ação destas telas implica em um acréscimo de pressões negativas aos valores do caso Sem Tela, ocorrendo em alguns pontos inversão do campo de pressões e ação de sucção onde ocorria sobrepressão. Este acréscimo é maior na presença da tela N, e diminui à medida que aumenta a porosidade. A intensidade de turbulência é reduzida, mantendo-se em valores aproximadamente constantes. A exceção são as telas com porosidade 37% (AB MRY e AB NRY), onde ocorre um pequeno acréscimo da intensidade de turbulência, a barlavento da região próxima ao topo da pilha.

Com a tela posicionada a sotavento da pilha, na posição EF, foram feitos ensaios com três porosidades distintas da malha (L, M e O). Com a tela O nessa posição, reduziram-se as sucções a sotavento da pilha, aumentando a sobrepressão a barlavento. Na configuração EF OSY, reduziram-se as sucções na região do topo, com um pequeno aumento da sobrepressão da base até a altura da tomada 40. No caso EF OSX anula-se a zona de sucções no topo da pilha. Em relação às outras telas, ocorre uma pequena redução a sotavento, na região ao pé da pilha. Nas outras tomadas, a presença destas telas não altera significativamente o escoamento. A exceção ocorre na configuração EF RX onde ocorre um pequeno acréscimo das pressões a sotavento, na região central da pilha e no seu topo.

Com duas telas posicionadas a barlavento e a sotavento da pilha, na posição AB + EF, foram feitos ensaios com três porosidades distintas da malha (L, M e O). A barlavento ocorreu um acréscimo de pressões negativas tanto maior quanto menor era a porosidade da tela, ocorrendo uma inversão do campo de pressões (onde ocorria sobrepressão no caso Sem tela passou a atuar pressões de sucção). A presença da tela mais alta (Y) a barlavento maximizou este efeito. A sotavento a tela O na posição X (afastamento 0,5H) implicou em

um aumento expressivo das sucções, enquanto que a mesma tela na posição Y (afastamento 1,5H) não alterou significativamente o campo de pressões a sotavento, implicando em pequena redução das sucções na região próxima ao solo e pequeno acréscimo das sucções na região próxima ao topo da pilha. Este mesmo efeito foi verificado com as telas L e M com afastamento X (0,5H). As telas L e M posicionadas a 1,5H (posição Y) reduziram suavemente os valores de sucções a sotavento da pilha, sendo esse efeito mais visível na região próxima ao solo.

No caso dos ensaios com as telas localizadas a sotavento, somente pressões médias foram medidas devido a um problema ocorrido com o equipamento de medição de pressões instantâneas.

As figuras 4.8 a 4.18 mostram mapas de isolinhas de coeficientes de pressão média de algumas configurações estudadas. As isolinhas estão traçadas a cada variação de 0,2 no coeficiente de pressão nos casos de sucção, e a cada 0,1 nos casos de sobrepressão. A medição das pressões sobre a superfície da pilha, sem proteção por telas, mostra claramente a influência do ângulo de incidência do vento, como pode ser visto nas figuras 4.8 e 4.9. Os maiores coeficientes médios de pressão e *rms* correspondem a ângulos de incidência do vento de 30° e 45°. As regiões mais afetadas são as próximas aos vértices da pilha e à aresta superior.

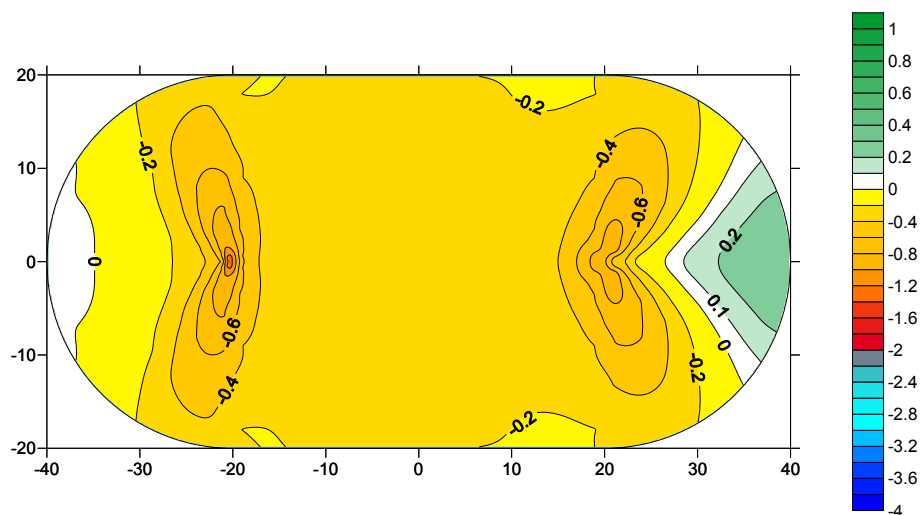


Figura 4.8 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 0°).

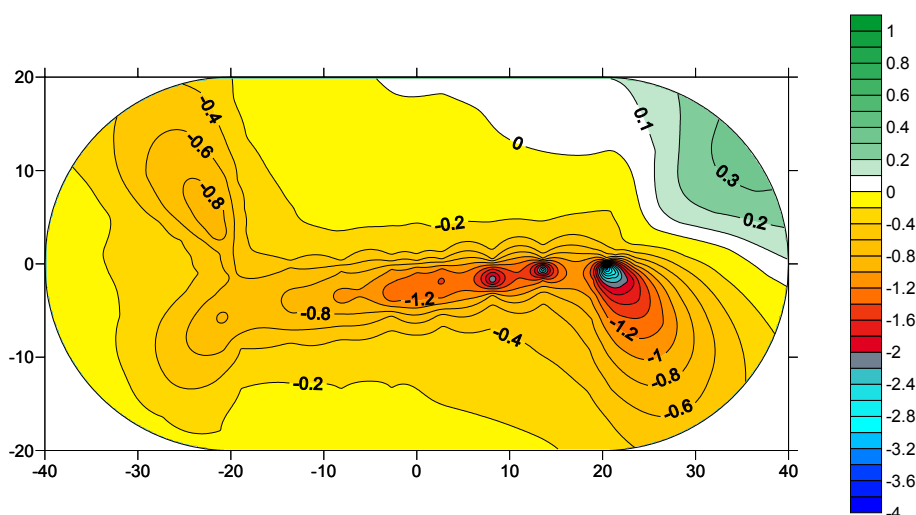


Figura 4.9 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 30°).

De um modo geral, os ensaios mostram que a presença da tela O a sotavento (posição EF) implica em um pequeno aumento dos níveis de sobrepressão. Não há grandes alterações no campo de pressões para o vento incidindo nos ângulos de 0° e 180°, com exceção da configuração EF OSX, onde ocorre um pequeno aumento do nível de sucções em algumas regiões junto à base da pilha.

Para vento incidindo a 30° e 150°, a presença da placa sólida reduz suavemente os valores de sucções, reduzindo os picos de sucções nas configurações EF OSY, EF OSX e EF ORX. Além disso, ocorre um aumento da região de sobrepressões, que se estende até a região a sotavento da pilha nas configurações EF OSX E EF ORX.

A 60° e 120° a presença da tela O a sotavento induz uma grande redução nos coeficientes de pressão atuantes, aparecendo uma pequena zona de sobrepressão a sotavento da pilha (figuras 4.10 e 4.11). Entretanto, nessas configurações aparecem regiões de picos de sucção que não existiam no caso SEM TELA. Sem a presença da tela o coeficiente de pressão mínimo verificado é da ordem de -1,2, enquanto que com a colocação da tela aparecem picos de sucção que ultrapassam -4.

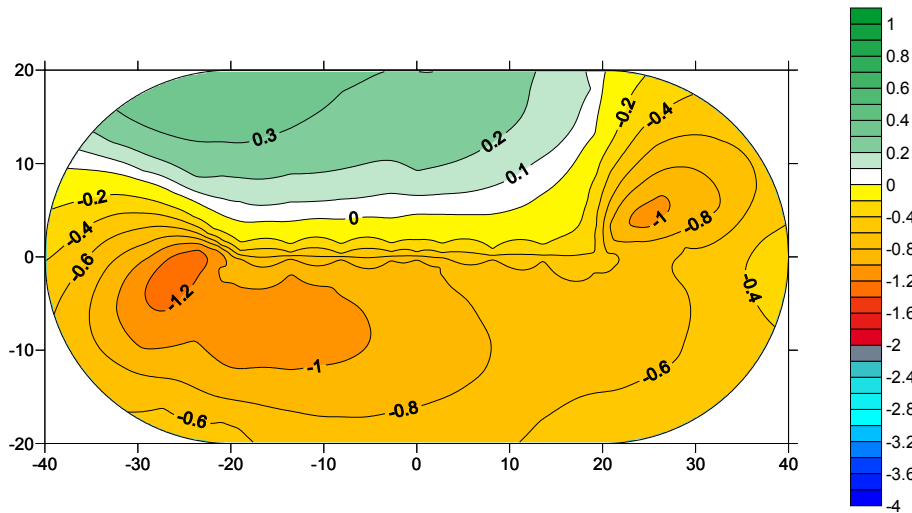


Figura 4.10 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 120°).

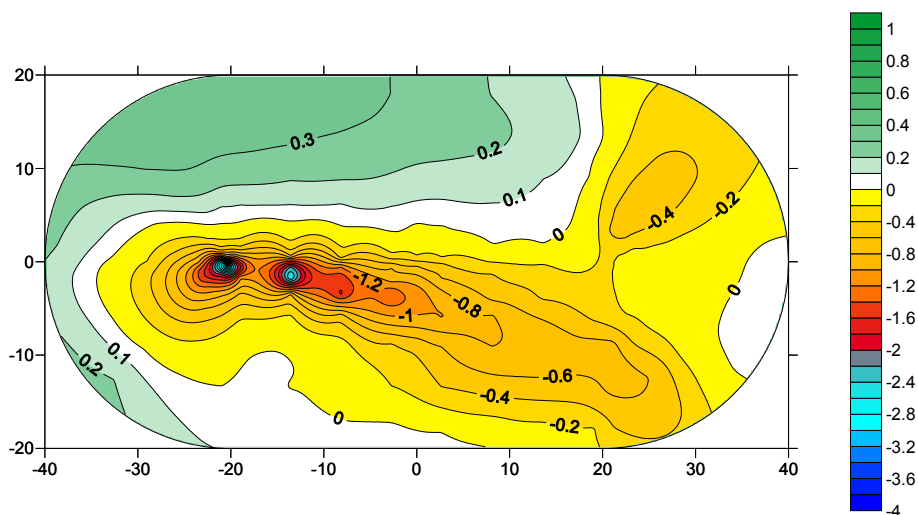


Figura 4.11 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (EF OSX 120°).

Para o vento incidindo perpendicularmente à maior dimensão da pilha (ângulo de 90°) houve, de um modo geral, uma pequena redução nos coeficientes de pressão atuantes. Nos casos EF ORY e EF OSX os valores mínimos dos coeficientes de pressão passaram de -1,2 para -0,8. Quando a tela está na posição X (distante 0,5H da pilha), cria-se uma região de recirculação entre a tela e a pilha, aparecendo regiões de sobrepressão na base da pilha a sotavento. Na configuração EF OSX, as regiões de picos de sucção, que inicialmente se localizavam no topo da pilha próximo às extremidades, migraram para a região mais

próxima ao centro, deslocando-se para sotavento. Na configuração EF ORX aumentou a intensidade dos picos de sucções e apareceram novas regiões na região mais próxima ao centro, a sotavento.

De um modo geral, os ensaios mostram que a presença da tela M (porosidade 37% e maior espaçamento entre os fios) na posição EF (a sotavento da pilha) não implica em grandes alterações no campo de pressões para o vento incidindo nos ângulos de 0° e 180°. Nas configurações EF MSX, EF MRY e EF MRX ocorre um pequeno aumento do nível de sobrepressão atuante na pilha. Na configuração EF MSY ocorre um pequeno aumento do nível de sucções em algumas regiões das bordas da face de maior dimensão da pilha.

Para o vento incidindo a 30° e 150°, não há grandes alterações no campo de pressões das configurações EF MRY e EF MRX. A presença destas telas apenas reduz um pouco a região de sobrepressão no lado oposto da tela. Ocorre uma redução discreta dos picos de sucções para vento incidindo a 30° e 150°, com a atuação das telas EF MSY e EF MSX, sendo que esta última reduz um pouco a região de sobrepressão.

Para o vento incidindo a 60° e 120°, ocorre um aumento do pico de sucções no topo da pilha, que na configuração SEM TELA tem um valor mínimo de -1,2, e passa a -2,2 na presença da tela M. Quando instalada a configuração EF MRY, há também um aumento na sobrepressão máxima atuante na pilha, que passa de 0,3 para 0,4.

Para o vento incidindo perpendicularmente à maior dimensão da pilha (ângulo de 90°) houve na configuração EF MSY uma redução de 0,4 para 0,3 nos picos localizados de sobrepressão e uma redução das sucções a sotavento, reduzindo os picos de sucções de -1,2 para -0,8. Nas configurações EF MSX, EF MRY e EF MRX (figuras 4.12 e 4.13) houve, na região de barlavento, um acréscimo da sobrepressão atuante na zona central da pilha. As configurações EF MSX e EF MRX reduziram as pressões atuantes a sotavento da pilha próximo a sua base. A configuração EF MRY mostrou uma redução pequena dos picos de sucção a sotavento da pilha.

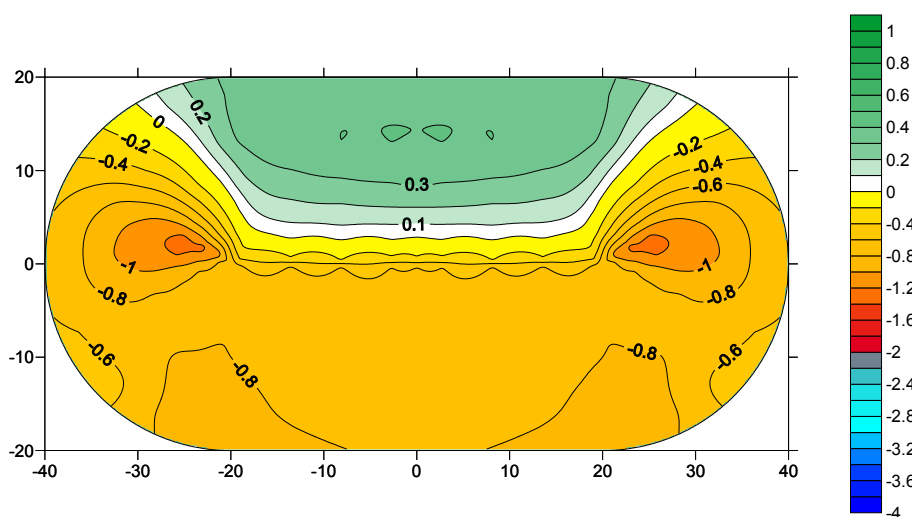


Figura 4.12 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 90°).

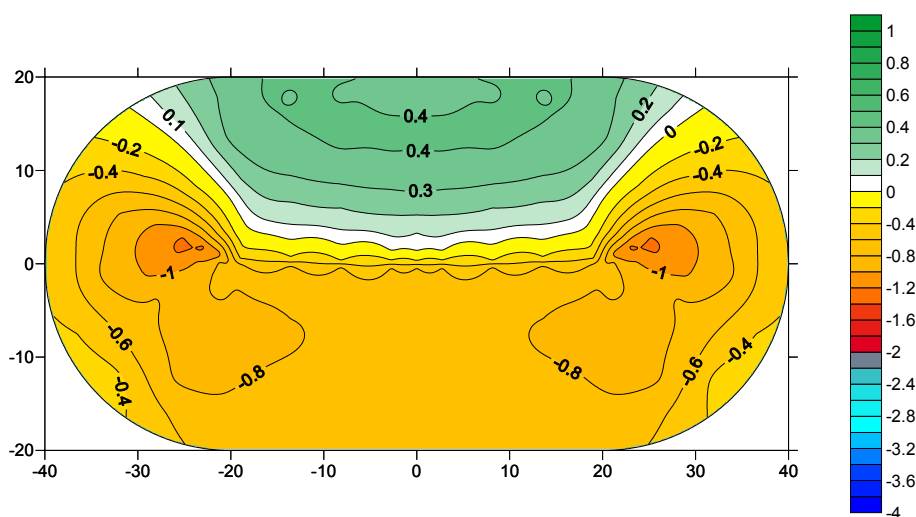


Figura 4.13 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (EF MRX 90°).

Os ensaios mostram que a presença da tela L (porosidade 53%) na posição EF (a sotavento da pilha) não implica em grandes alterações no campo de pressões para o vento incidindo nos ângulos de 0° e 180°, ocorrendo apenas um pequeno aumento do nível de sobrepressões atuantes na pilha nas configurações EF LSX, EF LRX e EF LRY. Na configuração EF LSY ocorreu apenas um pequeno aumento do nível de sucções em algumas regiões das bordas da face de maior dimensão da pilha.

Para vento incidindo a 30° e 150° , presença das telas EF LRX, EF LSX e EF LRY reduziu levemente os picos de sucções no topo da pilha. A presença da tela EF LSY (figuras 4.14 e 4.15) apenas reduziu um pouco a região de sobrepressão no lado oposto da tela. As configurações EF LRY e EF LSX aumentaram, na região de barlavento, a região de sobrepressão na zona central da pilha.

Para o vento incidindo a 60° e 120° , ocorre um aumento do pico de sucções no topo da pilha, que na configuração SEM TELA tem um valor máximo de -1,2, e passa a -1,6 na presença das telas EF LSX, EF LRY e EF LRX. A tela EF LSY eleva esse coeficiente de pressão máximo a -1,8.

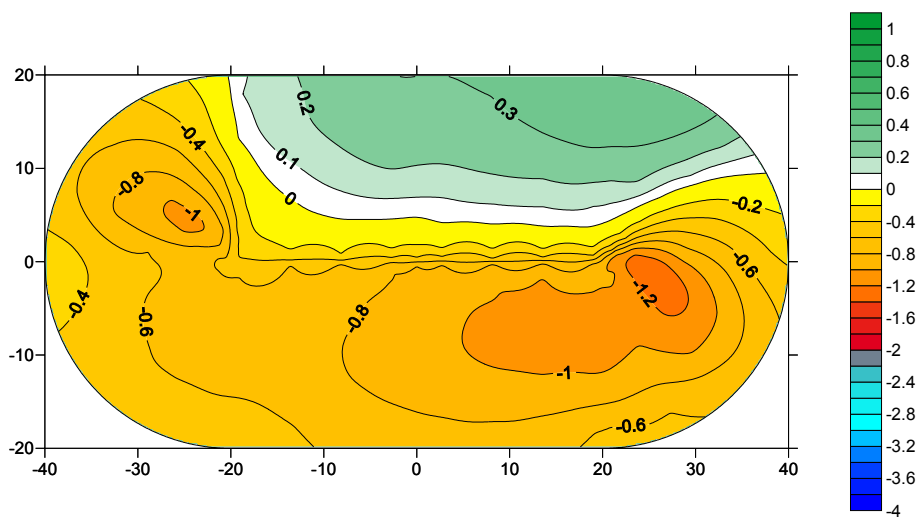


Figura 4.14 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (SEM TELA 60°).

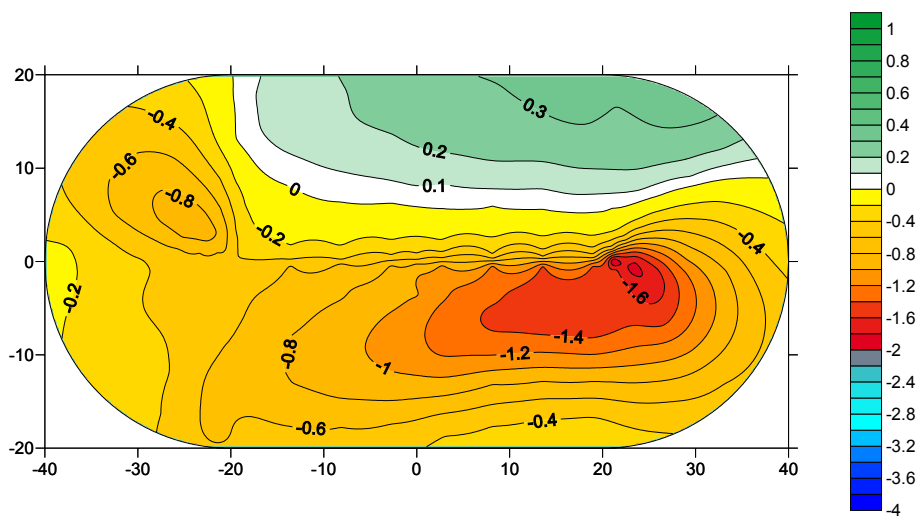


Figura 4.15 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (EF LSY 60°).

Para o vento incidindo perpendicularmente à maior dimensão da pilha (ângulo de 90°) houve na configuração EF LSY uma redução das sucções a sotavento, reduzindo os picos de sucções de -1,2 para -1,0. Em todas as configurações estudadas da tela L houve, na região de barlavento, um acréscimo da sobrepressão atuante na zona central da pilha. As configurações EF LRY, EF LSX e EF LRX reduziram discretamente as pressões atuantes a sotavento da pilha próximo a sua base, sendo que as telas EF LSX e EF LRX mantiveram os picos de sucções inalterados e a tela EF LRY reduziu estes picos.

Foram testadas algumas configurações a 90° com telas a barlavento e sotavento da pilha. A presença de duas placas (telas O) implicou em um grande acréscimo das sucções atuantes, em todas as configurações testadas, como pode ser observado na figura 4.16. A presença das telas M criou uma região de sucções a barlavento, com coeficientes de pressão oscilando entre -0,2 e -0,8 (figura 4.17). A sotavento, essas telas mantiveram ou reduziram os níveis de sucção, mantendo os picos na mesma posição, sempre com valores reduzidos. A região de sotavento da configuração AB MRX EF MSX teve um coeficiente de pressão igual a -0,8 em quase toda a sua extensão. A presença das telas L implicou em uma redução dos valores de sobrepressão a barlavento (figura 4.18).

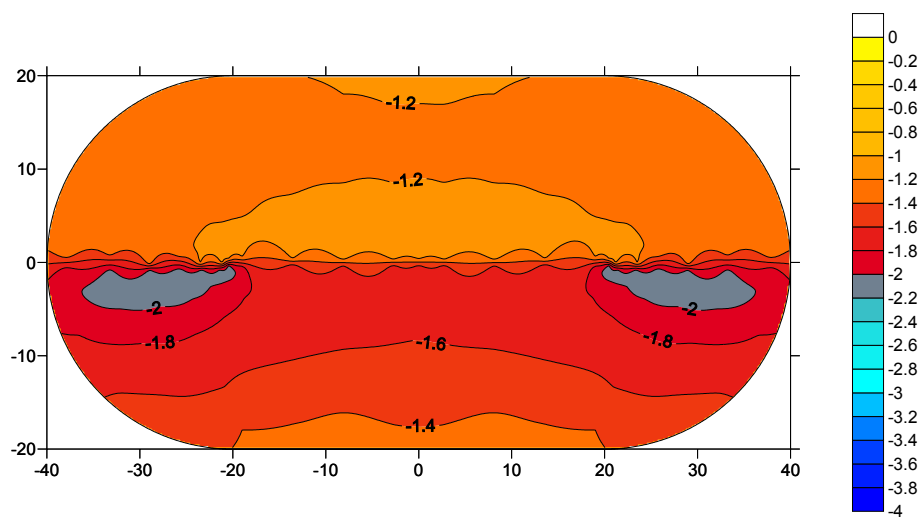


Figura 4.16 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (AB ORY EF OSY 90°).

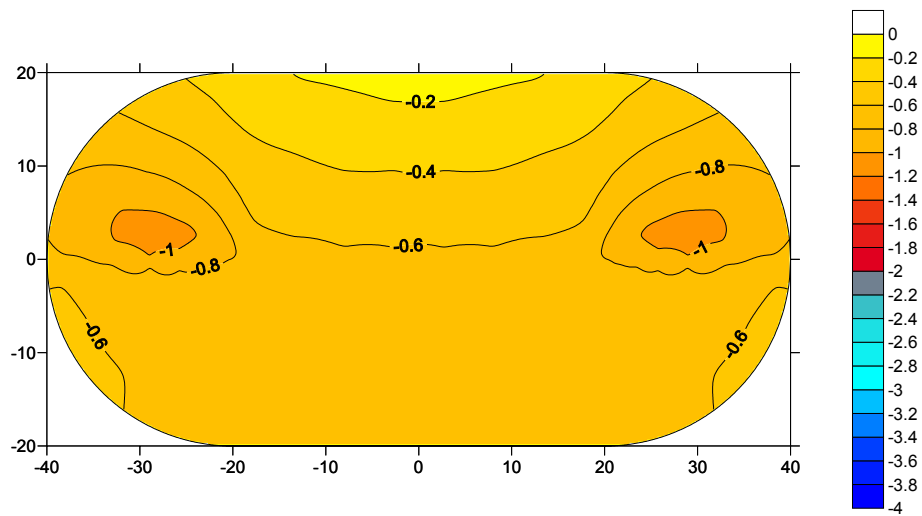


Figura 4.17 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (AB MSX EF MRX 90°).

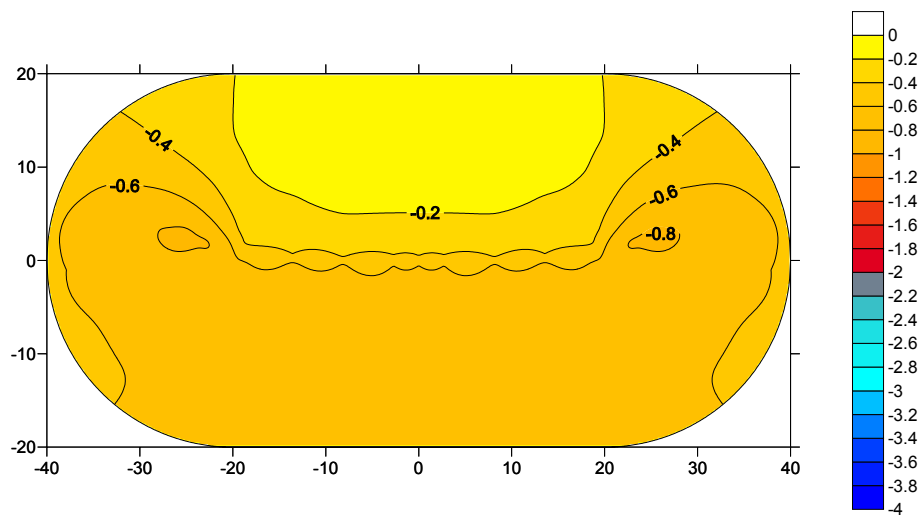


Figura 4.18 – Mapas de isolinhas de coeficientes de pressão (AB LRY EF LRY 90°).

4.3 Visualização do escoamento

Neste trabalho foram empregadas duas técnicas de visualização: (a) técnica de injeção de fumaça a barlavento, e (b) técnica de visualização através de hastes flexíveis. As figuras 4.19 a 4.23 ilustram as técnicas utilizadas.

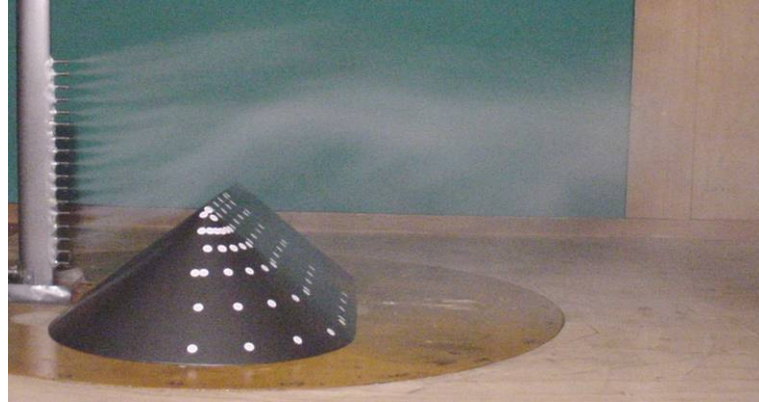


Figura 4.19 – Visualização do escoamento com fumaça.

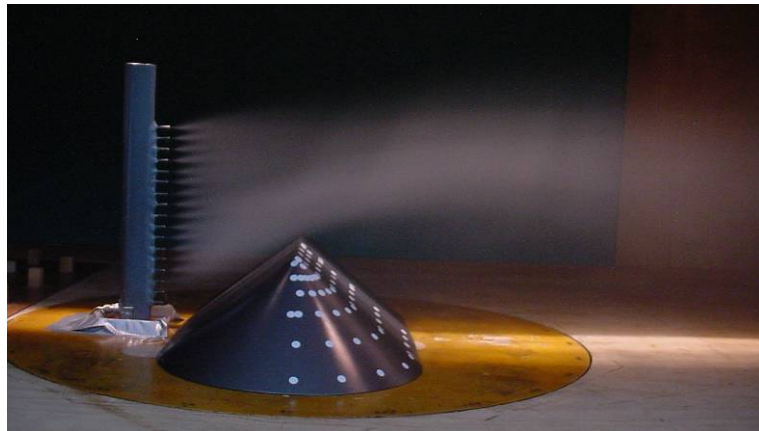


Figura 4.20 – Visualização do escoamento com fumaça.

A utilização da fumaça permite a visualização da região da camada de vórtices e esteira. Já com a utilização das hastes flexíveis é possível visualizar-se o fenômeno da reversão do escoamento na região mais baixa da esteira, junto à superfície de sotavento da pilha.

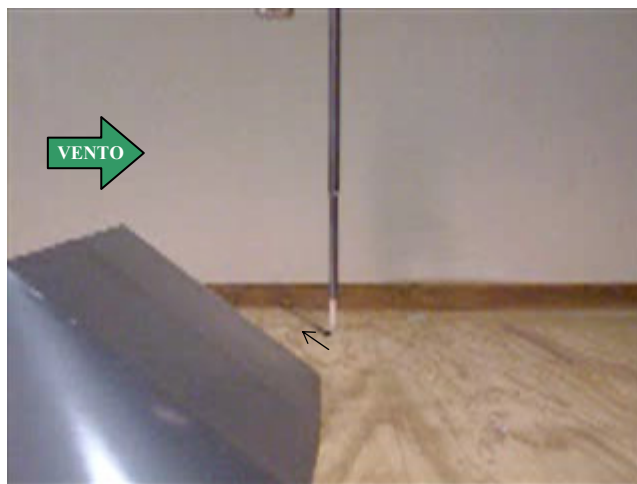


Figura 4.21 – Visualização do escoamento com haste flexível.



Figura 4.22 – Visualização do escoamento com haste flexível.

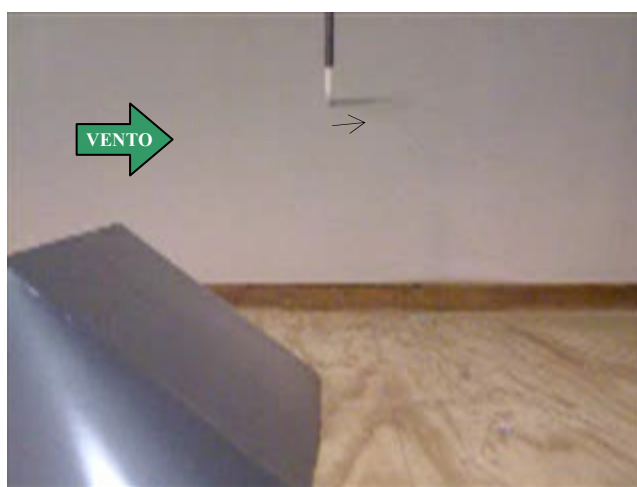


Figura 4.23 – Visualização do escoamento com haste flexível.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões

5.1 Conclusões

No presente trabalho foram estudadas as transformações que ocorrem em um campo de escoamento de ar ao redor de uma pilha típica de carvão com a introdução de telas de proteção. Uma pilha em escala 1/125 foi ensaiada em um túnel de vento de circuito fechado. Foi testada a eficiência de cinco telas com porosidades distintas, cada uma com duas diferentes alturas e em diferentes posições, totalizando 71 configurações estudadas.

Foram medidas velocidades médias tangenciais e suas flutuações em cinco pontos selecionados sobre a superfície do modelo, as quais estão diretamente relacionadas com a emissão de material particulado a partir da superfície. Além disso, mediram-se perfis de velocidades médias longitudinais nas faces de barlavento e sotavento da pilha.

Percebe-se claramente que as velocidades médias tangenciais são mais altas próximo ao topo da pilha, e que a presença de uma tela de proteção causa uma redução destas velocidades. Os ensaios mostram que à medida que se reduz a porosidade da tela, reduz-se também as velocidades médias atuantes na pilha. As flutuações da velocidade tangencial comportam-se de maneira inversa na parte superior da pilha, diminuindo à medida que aumenta-se a porosidade da tela. Dessa maneira, telas com porosidades intermediárias (da ordem de 53%) oferecem um melhor efeito de proteção considerando a redução de velocidades tangenciais.

Além do campo de velocidades, também as distribuições de pressões médias e flutuantes foram determinadas para diversos ângulos de incidência do vento, bem como para distintas combinações de porosidades, alturas e posições das telas de proteção.

Quando posicionada a barlavento, a placa sólida apresentou os maiores valores absolutos dos coeficientes de pressão e de seu valor *rms*, mostrando que a placa e a pilha formam uma cavidade. Para a configuração AB, mesmo afastamento e mesma porosidade, para a tela mais alta ocorre uma tendência de diminuição do coeficiente de pressão médio e de aumento das flutuações, o que favoreceria a erosão de material particulado. No caso SEM TELA, os valores médios mostram a presença de sobrepressões sobre uma grande área da face de barlavento da pilha, porém com valores de flutuações mais elevados que para as

telas porosas. O afastamento da tela também influi no campo de pressões, porém em menor medida que a porosidade ou a altura da tela.

Uma tela menos porosa, embora ofereça uma maior redução das velocidades médias, aumenta a turbulência a sotavento da tela. A presença de telas a barlavento modifica a espessura da camada de vórtices do escoamento, entretanto acima de $2H$ não se verifica uma influência significativa no escoamento.

Para a configuração CD, a presença da tela implica em um aumento no valor absoluto dos coeficientes de pressão, sendo que a Tela O apresenta os maiores valores. A tela O apresenta um bom desempenho quando posicionada a sotavento da pilha, na posição EF, pois reduz nesta posição os valores das sucções.

Quando existe a presença de duas telas, a presença da placa sólida implica em grandes elevações dos níveis de sucções no modelo, sendo que telas de menor porosidade reduzem as zonas de sobrepressão a barlavento, transformando-as em regiões de sucções moderadas. O campo de pressões a sotavento não sofre grandes alterações quando há a presença de duas telas de menor porosidade.

De uma forma geral, telas com porosidade entre 37% e 53% mostraram-se mais eficazes em minorar os efeitos nocivos provocados pela combinação dos picos de sucções na superfície com as velocidades tangenciais atuantes.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar a viabilidade de proteção com barreiras intermitentes, de forma a facilitar a circulação nos pátios de armazenamento;
- Analisar a eficiência do uso de múltiplas telas de proteção;
- Modelar de um conjunto de pilhas avaliando o efeito da utilização de telas intermediárias;
- Verificar a ação de telas de proteção com características diferenciadas, tais como porosidade crescente ou decrescente com a altura;

- Avaliar a influência das características geométricas da pilha, utilizando-se outras configurações de pilhas de carvão com geometria diversa;
- Analisar a influência de pequenas barreiras porosas, tais como esteiras, ao longo da pilha de carvão;
- Definir um parâmetro quantitativo para avaliação de métodos de proteção de pilhas submetidas a erosão por ação do vento.

Capítulo 6 – Referências

6.1 Referências Consultadas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66p.

BADR, T.; HARION, J. L. **Numerical modeling of flow over stockpiles: implications on dust emissions**. Atmospheric Environment, [S.l.], v.39, p. 5576-5584, 2005.

BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1995. 166p.

BLESSMANN, J. **The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.10, n.2, p.231-248, Aug 1992.

BORGES, A. R.; VIEGAS, D. X. **Shelter effect on a row of coal piles to prevent wind wrosion**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.29, p.145-154, 1988.

BP. **Coal production**. Disponível em <<http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9010964&contentId=7021586>>. Acesso em 12 novembro 2006.

BP. **Coal consumption**. Disponível em <<http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9010964&contentId=7021586>>. Acesso em 12 novembro 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. O Carvão. In: **Atlas de energia elétrica**. Brasília, 2. ed., p. 119 – 126, 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 10 outubro 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 005 de 15 de junho de 1989**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res89/res0589.html>>. Acesso em: 28 set. 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 003 de 28 de junho de 1990**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>>. Acesso em: 28 set. 2006.

DANTEC DYNAMICS: Constant Temperature Anemometry. **Dantec Dynamics A/S**. Tonsbakken, 2006. Disponível em: <<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=654>>. Acesso em 01 nov. 2006.

DEUTCHLAND. Fachhochschule Darmstadt. **Strömungsmaschinen Praktikum Luftdurchsatzmessung im Windkanal**. [S.l.]. 36p. Disponível em: <<http://www.fsm.fh-darmstadt.de/files/sm2/berichte-0405/luftdurchsatzmessung+im+windkanal.pdf>>. Acesso em 20 novembro 2006.

FERREIRA, A. D.; VAZ, P. A. **Wind tunnel study of coal dust release from train wagons**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.92, p.565-577, 2004.

FERREIRA, A. D.; VIEGAS, D. X.; SOUSA, A. C. M. **Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.91, p.1271-1283, 2003.

GANDEMER, J. **The aerodynamic characteristics of windbreaks resulting in empirical design rules.** Journal of Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.7, p.15-36, 1981.

GANDEMER, J. **Wind shelters.** Journal of Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.4, p.371-389, 1979.

GUERRA, T. Geologia. In: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Biociências. Centro de Ecologia. **Carvão e meio ambiente.** Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. p. 18 – 25.

KIND, R. J. **Mechanics of aeolian transport of snow and sand.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.36, p.855-866, 1990.

KRELL, A. J. Aspectos jurídico-políticos – atribuições, obrigações e possibilidades dos municípios da Região Carbonífera gaúcha na proteção do meio ambiente. In: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Biociências. Centro de Ecologia. **Carvão e Meio Ambiente.** Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. p. 189 – 257.

LEE, S.; PARK, C. **Surface pressure characteristics on a triangular prism located behind a porous fence.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.80, p.69-83, 1999.

LEE, S.; PARK, C. **The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.84, p.101-118, 2000.

LEE, S.; PARK, K.; PARK, C. **Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.36, p.1453-1463, 2002.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; GUIMARÃES, A. F.; PIMENTEL, J. L.; IGNÁCIO, L. R. **Wind tunnel testing of a coal pile of the CVRD – Vitória, Brazil, and the effects caused by porous fences.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], 2006. Submetido.

LOREDO-SOUZA, A. M. ; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. **Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento.** In: Möler, S. V.; Silvestrini, J. H. (Org.). Turbulência. Porto Alegre: ABCM, 2004, v. 4, p. 137-163.

NEVES, G. R.; CHAVES, S. H. A. A Região Carbonífera “tradicional” do Rio Grande do Sul. In: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Biociências. Centro de Ecologia. **Carvão e meio ambiente.** Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. p. 108 – 124.

ORTIZ, L.; TEIXEIRA, E. C. Influência das atividades de processamento do carvão sobre a qualidade dos recursos hídricos superficiais. In: TEIXEIRA, E. C.; PIRES, M. J. R.

(Org). **Meio ambiente e carvão**: impactos da exploração e utilização. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p. 301 – 340.

PARKER, A. (Org.). **Industrial air pollution handbook**. Londres: McGraw-Hill, p.1-31, 1978.

POSCO E&C. **Outline of Dust Protection Net of Kwangyang Works of POSCO**

RAINE, J. K.; STEVENSON, D. C. **Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer**. Journal of Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.2, p.159-180, 1977.

RANGA RAJU, K. G. *et al.* **Experimental study on characteristics of flow past porous fences**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, [S.l.], v.29, p.155-163, 1988.

SCHEIBE, L. F. O carvão em Santa Catarina: mineração e conseqüências ambientais. In: TEIXEIRA, E. C.; PIRES, M. J. R. (Org). **Meio ambiente e carvão**: impactos da exploração e utilização. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p. 45 – 66.

SCHETTINI, E. B. C.; LOREDO-SOUZA, A. M. **Estudo em túnel de vento dos efeitos de proteção propiciados por telas porosas ao transporte eólico de partículas de carvão**: Determinação da influência do escoamento e das características das telas de proteção para o conjunto de pilhas de estocagem que formam o pátio de carvão da CVRD em Tubarão. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico. Porto Alegre. Outubro 2004.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National emission standards of hazardous air pollutants (NESHAP) for integrated iron and steel plants**: background information for proposed standards (final report EPA-453/R-01-005). [S.l.:S.n], 220p., jan 2001. Disponível em: <<http://www.epa.gov>> Acesso em: 03 setembro 2005.

UNITED STATES. *Kansas State University*. **Agricultural experiment station and cooperative extension service**: 5 year action plan. 13p. Disponível em: <http://www.oznet.ksu.edu/dp_prev/PDFs/NREM3.2.pdf> Acesso em: 25 outubro 2006.

VENNARD, J. K., STREET, R. L. **Elementos de mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

WHITE, F. M. Introdução. In: WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1999. cap. 1, p. 12.

YALIN, M. S. **Mechanics of sediment transport**. 2th ed. Great Britain: Pergamon Press, 1977. 298p.

YANG, C. T. **Sediment transport: theory and practice**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1996. 396p.

ZANNETTI, P. The problem: air pollution. In: ZANNETTI, P. **Air pollution modeling**: theories, computational methods and available software. New York: Computational Mechanics Publications, p. 1-24, 1990.

6.2 Referências Adicionais

As referências citadas a seguir não foram consultadas diretamente, e sim citadas nas referências apresentadas no item 6.1. Optou-se por manter aqui o formato utilizado por cada autor para a citação.

WILLIAMSON, S. J. (1973): *Fundamentals of air pollution*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

FRANK, H. T. *Geologia e geomorfologia das folhas de Morretes, São Leopoldo, São Jerônimo, Guaíba e Arroio dos Ratos – RS*. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geociências da UFRGS, 1989. 160p.

HELGEN, S. O.; MOORE, J. N. Natural background determination and impact quantification in trace metal contaminated river sediments. *Environ. Sci. Technol.*, v. 30, p. 129-135, 1996.

M. A. VELIKANOV: *Dynamics of Alluvial Streams, Vol. II (Sediment and Flow Bed)*, State Publishing House of the Theoretical and Technical Literature, Moscow, 1955 (em russo).

H. KAISER, Die Stromung na Windschutzstreifen (The airflow through shelterbelts), *Berichte Deutscher Wetterdienstes*, 7, No. 53, 1959.

E. J. PLATE, The aerodynamics of shelterbelts, *Agric. Meteorol.*, 8 (1971).

M. JENSEN, The model law for phenomena in the natural wind, *Ingenioren, Int. Edn.*, 2 (1958) 151.

H. KAISER, Die Stromung na Windschutzstreifen (The airflow through shelterbelts), *Berichte Deutscher Wetterdienstes*, 7, No. 53, 1959.

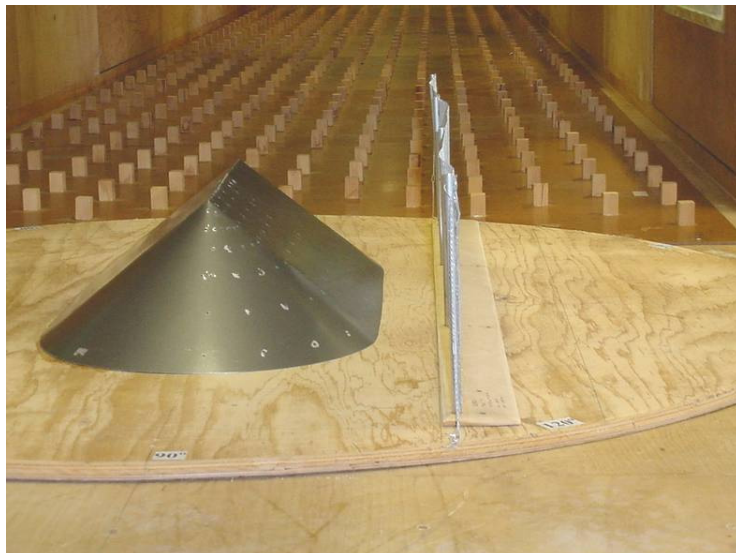
ABREU, S. F. *Recursos minerais do Brasil*. São Paulo: Edgar Blucher, 1973. v. 2.

P. F. D. DU BOYS: Lê Rhone et lê rivier a lit affouillable. *Annales des Ponts et Chaussées* 18, ser. 5 (1879).

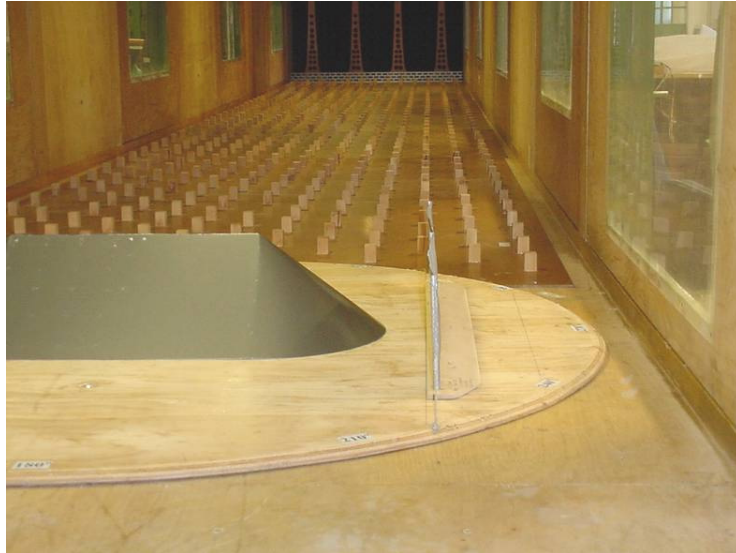
ANEXO A



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo genérico, altura R (1H) e afastamento Y (1,5H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo genérico, altura S (1,5H) e afastamento X (0,5H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo genérico, altura R (1H) e afastamento X (0,5H)



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo genérico, altura S (1,5H) e afastamento Y (1,5H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo K ($\epsilon = 68\%$), altura R (1H).



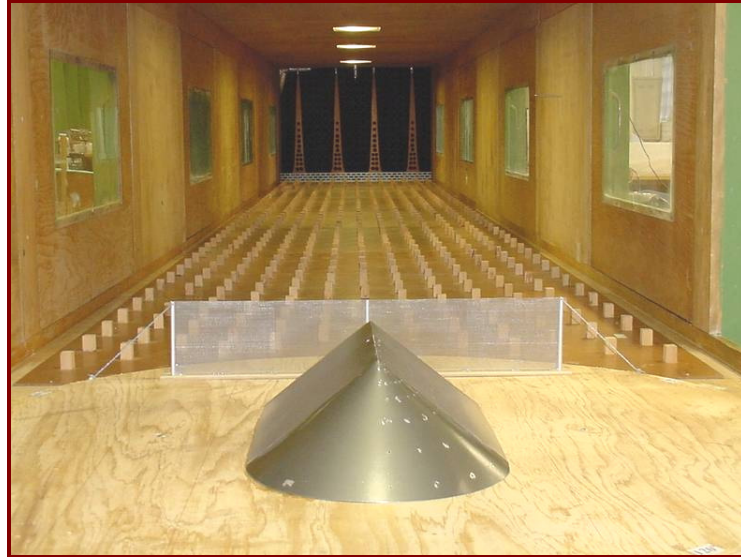
Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo K ($\epsilon = 68\%$), altura S (1,5H).



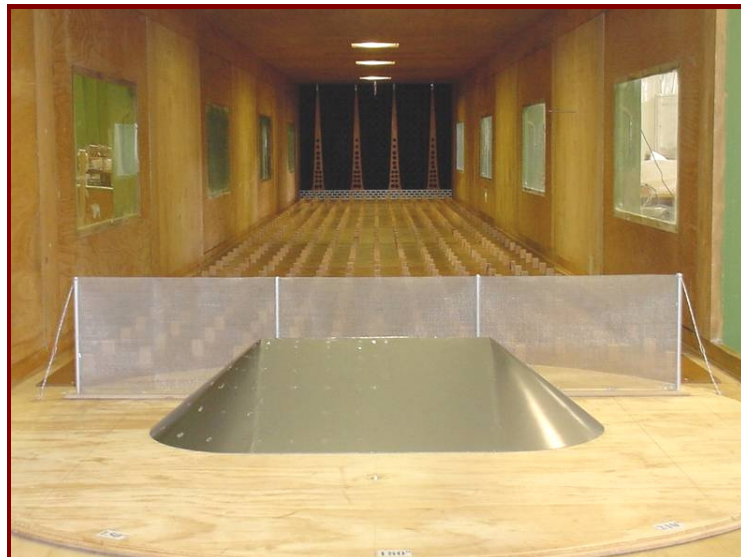
Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo L ($\epsilon = 53\%$), altura R (1H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo L ($\epsilon = 53\%$), altura S (1,5H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo M ($\epsilon = 37\%$, fio 0,02mm), altura R (1H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo M ($\epsilon = 37\%$, fio 0,02mm), altura S (1,5H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo N ($\epsilon = 37\%$, fio 0,01mm), altura R (1H).



Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo N ($\epsilon = 37\%$, fio 0,01mm), altura S (1,5H).

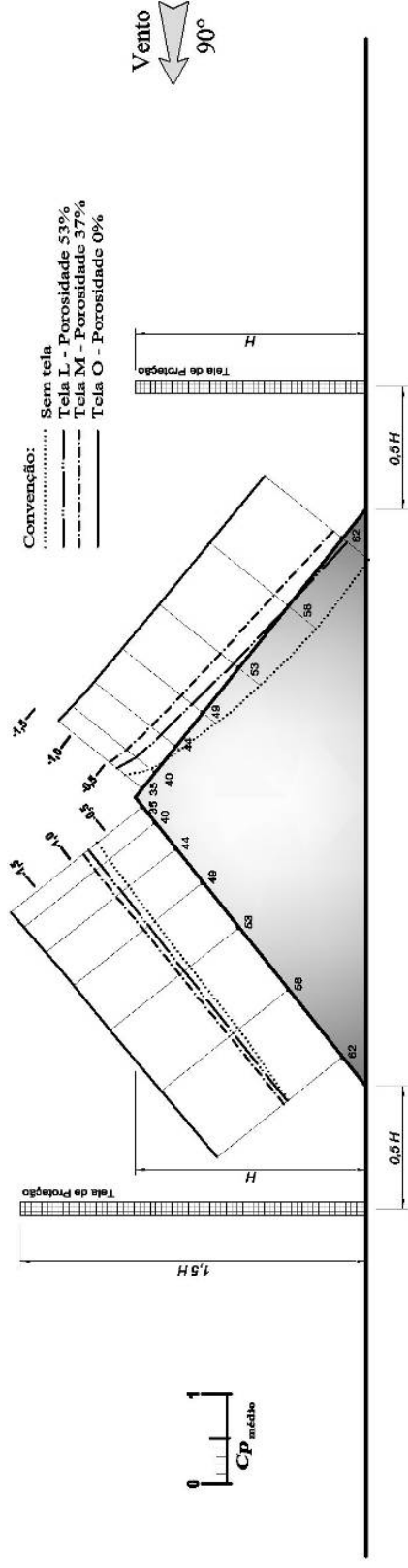


Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo O ($\epsilon = 0\%$ - placa sólida), altura R (1H).

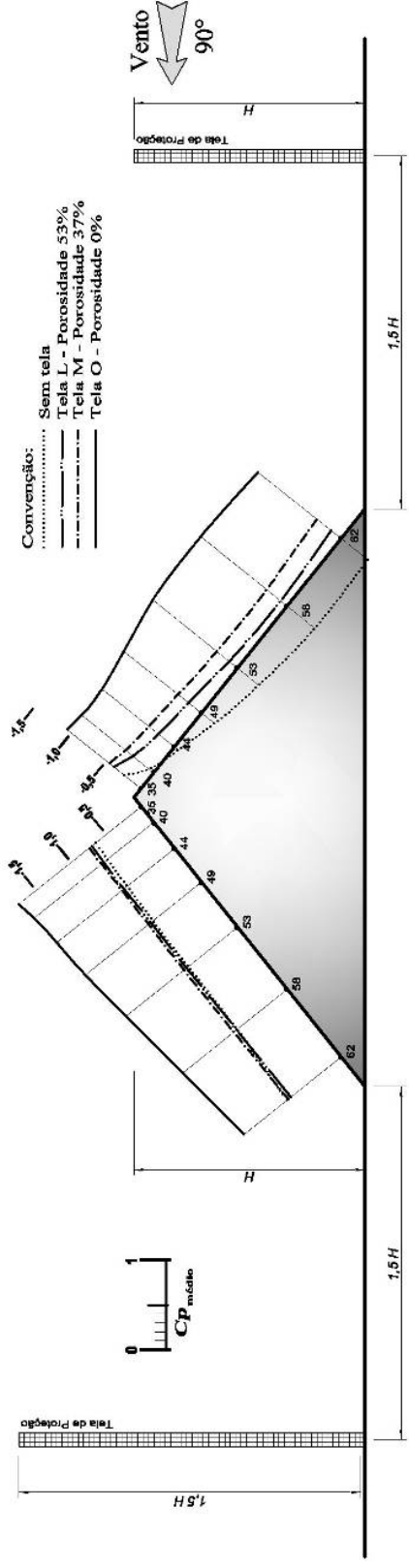


Modelo da pilha de carvão isolada no interior do Túnel de Vento com anteparo tipo O ($\epsilon = 0\%$ - placa sólida), altura S (1,5H).

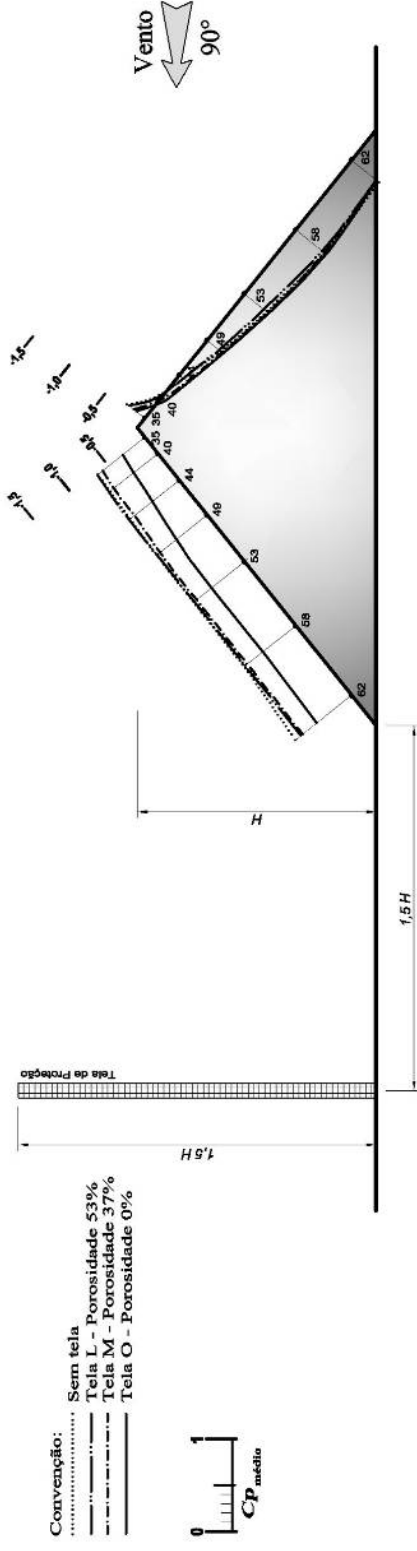
ANEXO B



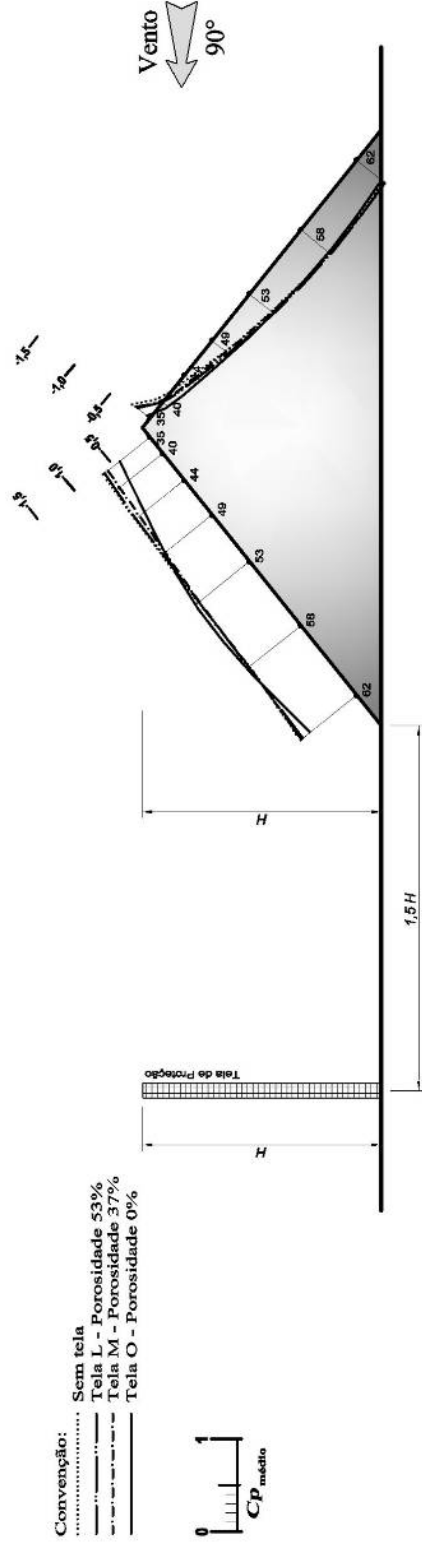
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
 Configuração AB-RX + EF-SX



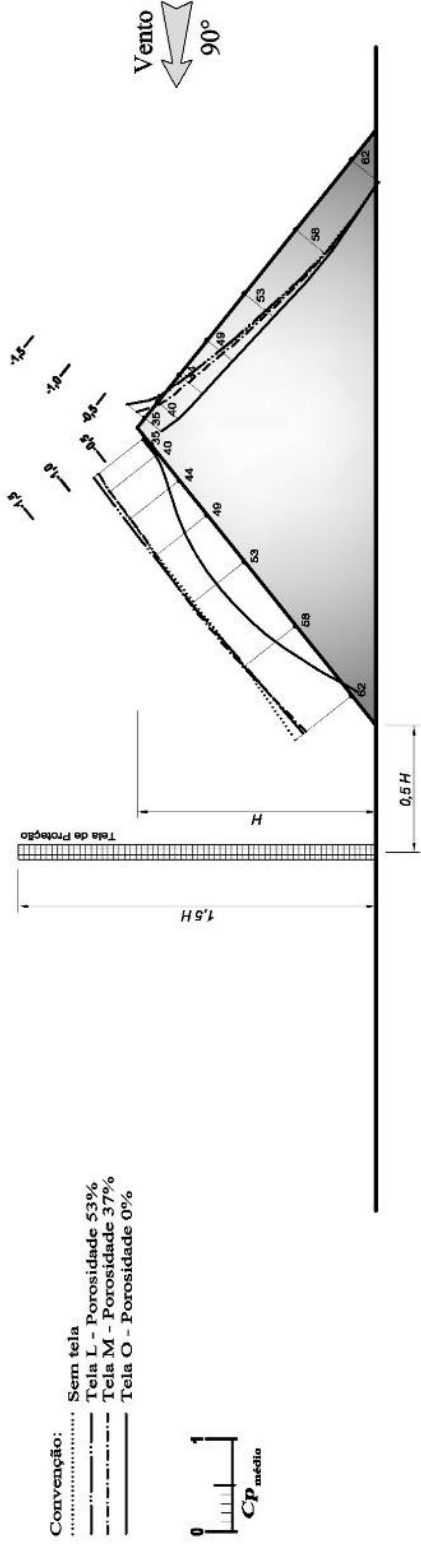
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
 Configuração AB-RY + EF-SY



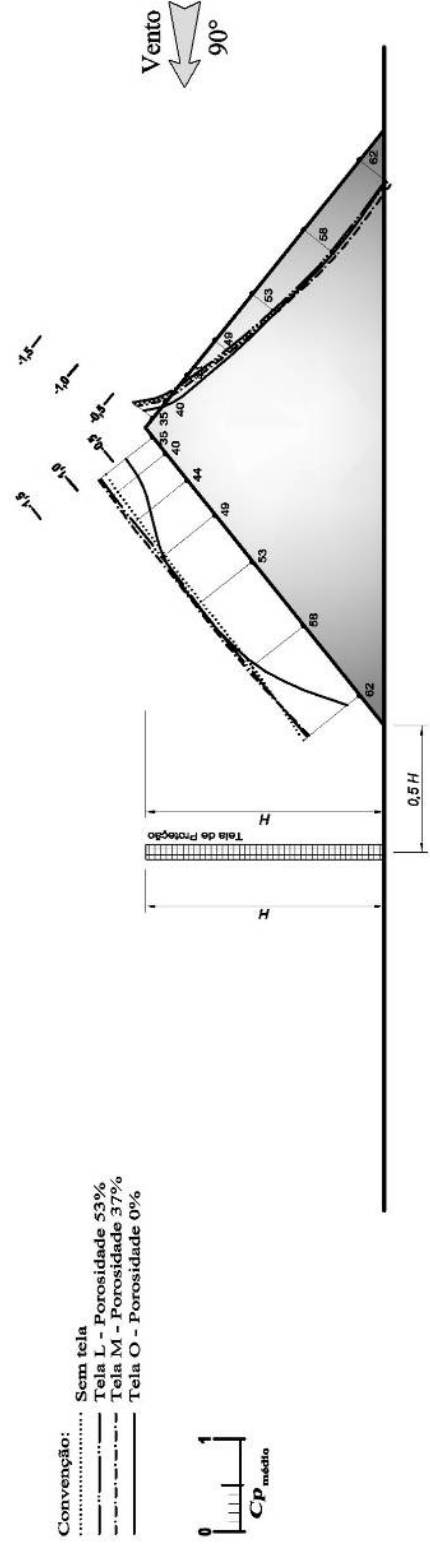
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração EF-SY



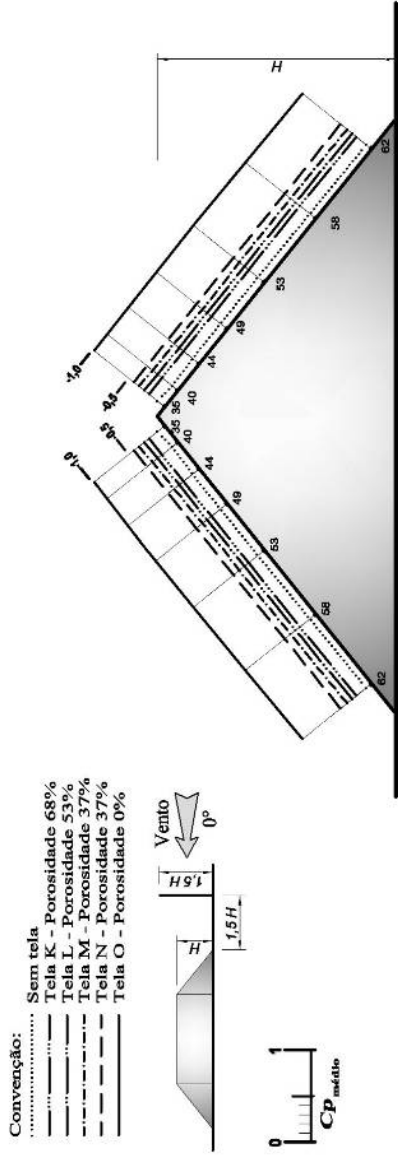
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração EF-RY



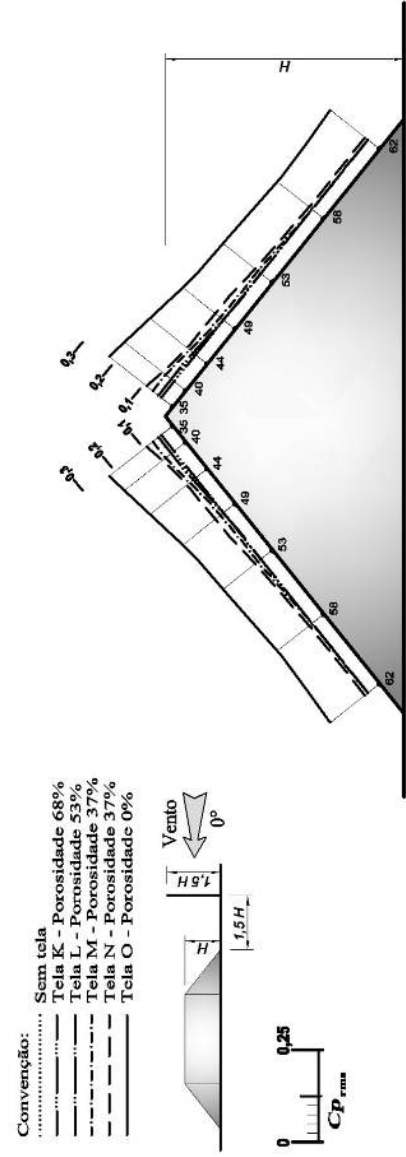
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
 Configuração EF-SX



Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
 Configuração EF-RX

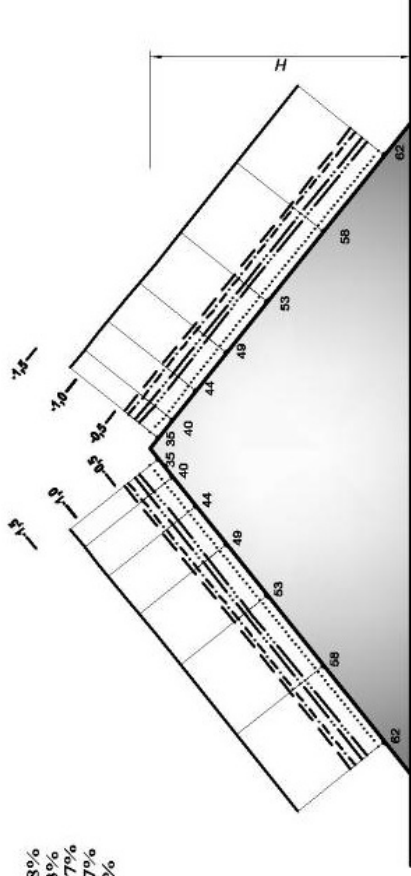
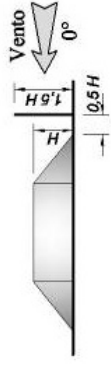


Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-SY



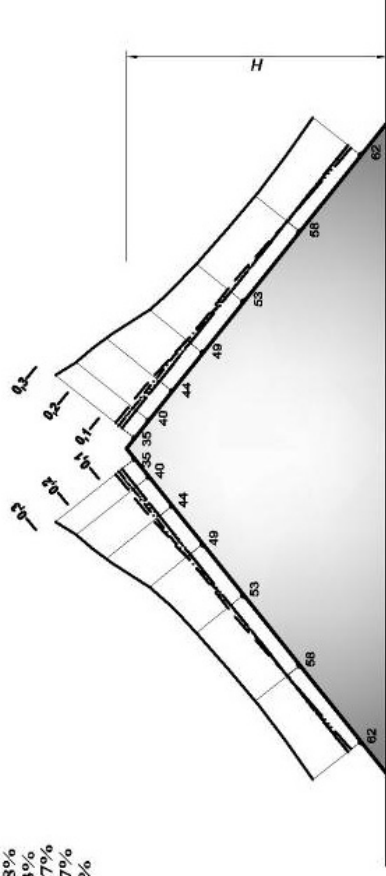
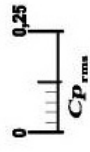
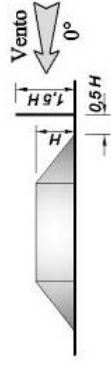
Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-SY

- Convenção:
- Sem tela
 - Tela K - Porosidade 68%
 - Tela L - Porosidade 53%
 - Tela M - Porosidade 37%
 - Tela N - Porosidade 37%
 - Tela O - Porosidade 0%

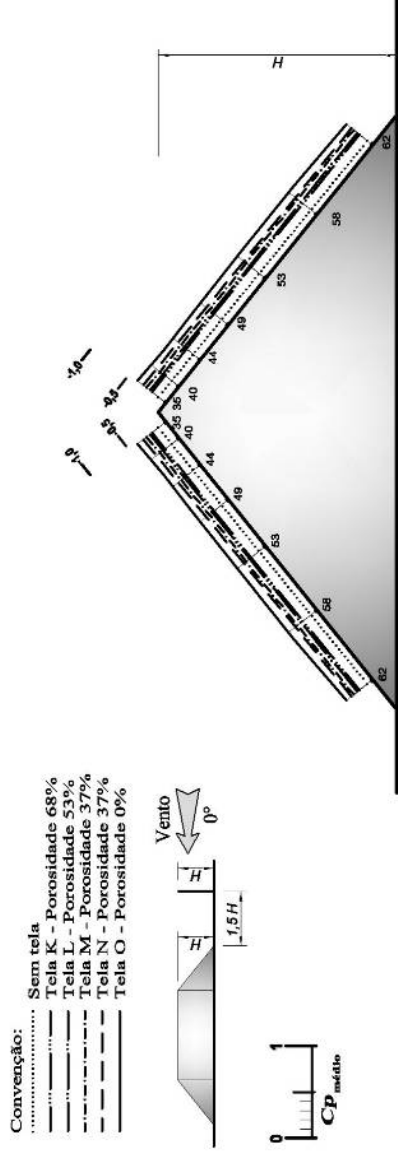


Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-SX

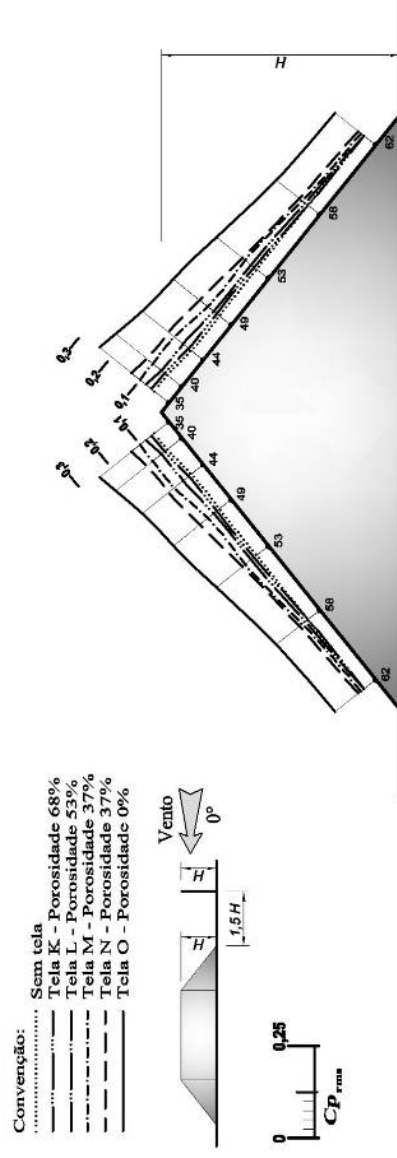
- Convenção:
- Sem tela
 - Tela K - Porosidade 68%
 - Tela L - Porosidade 53%
 - Tela M - Porosidade 37%
 - Tela N - Porosidade 37%
 - Tela O - Porosidade 0%



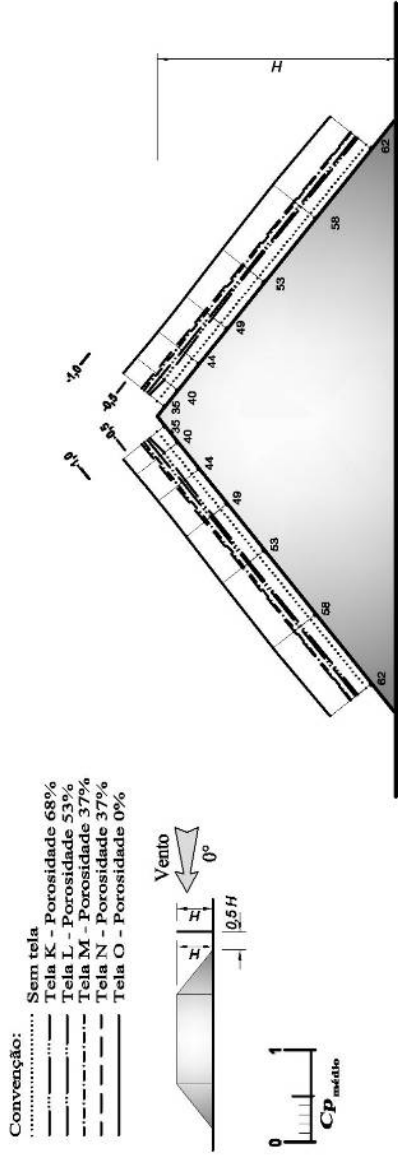
Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-SX



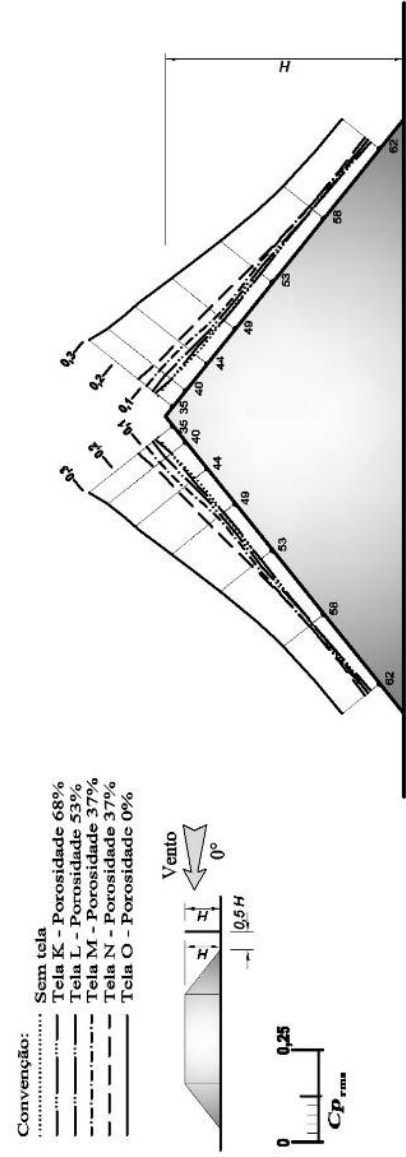
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-RY



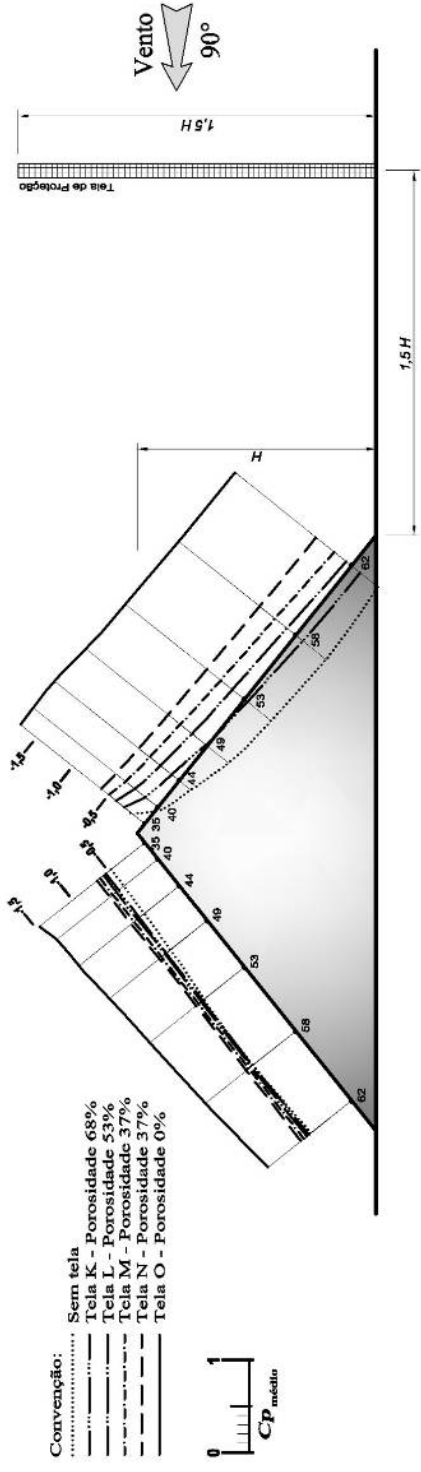
Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-RY



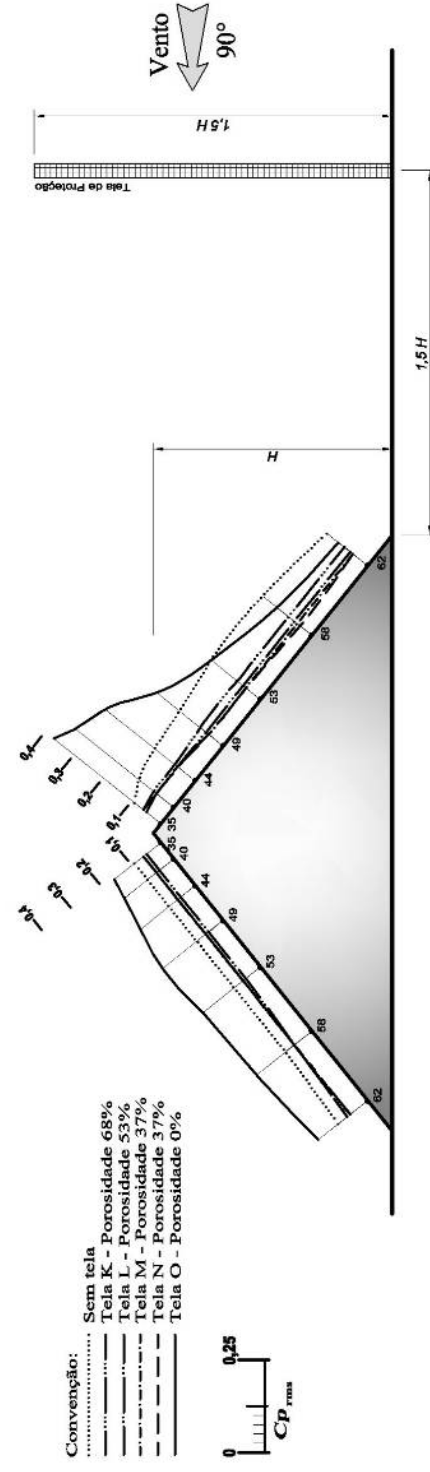
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-RX



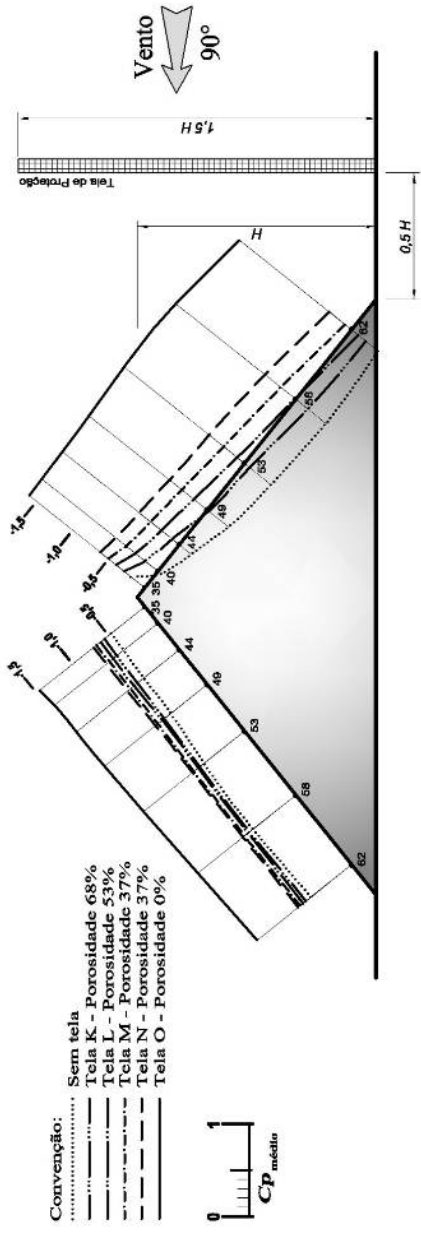
Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração CD-RX



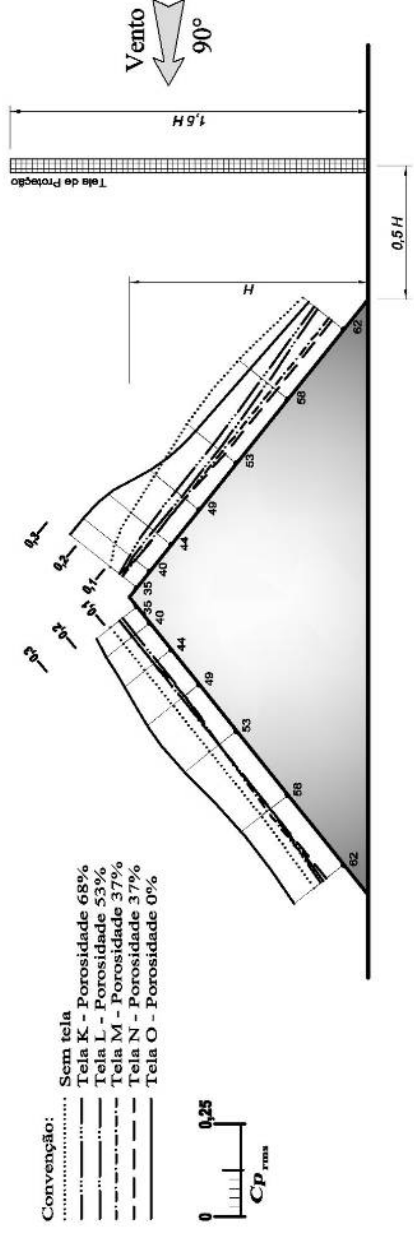
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-SY



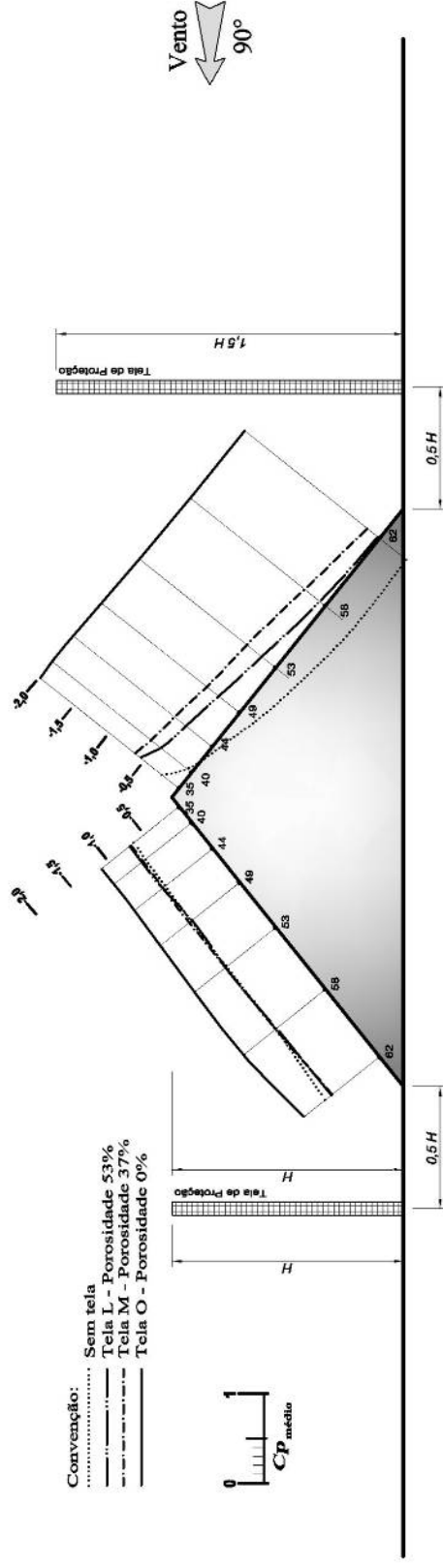
Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-SY



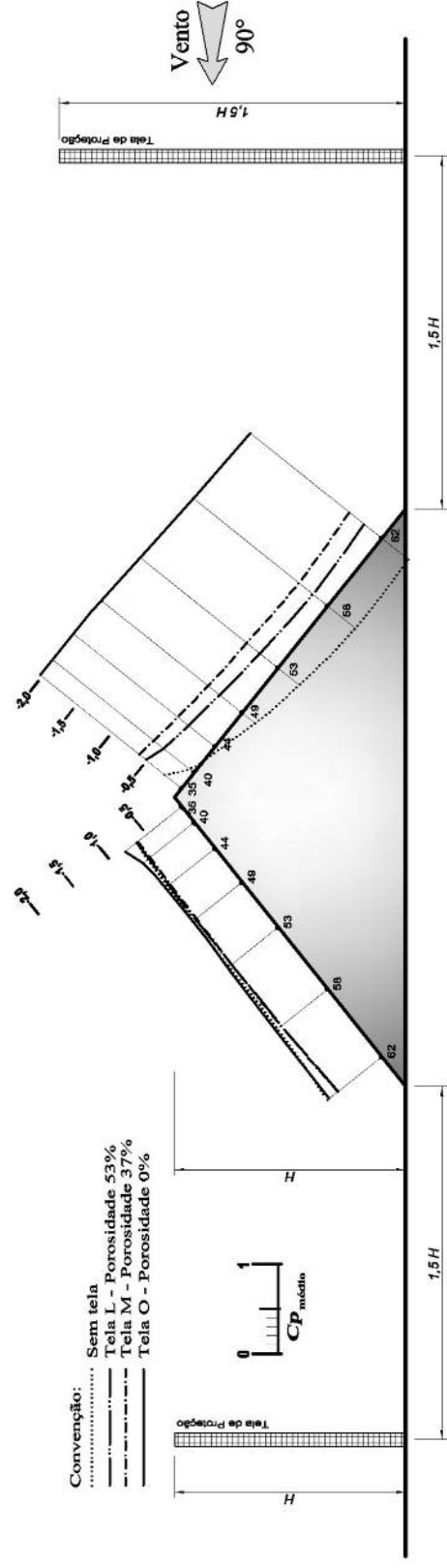
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-SX



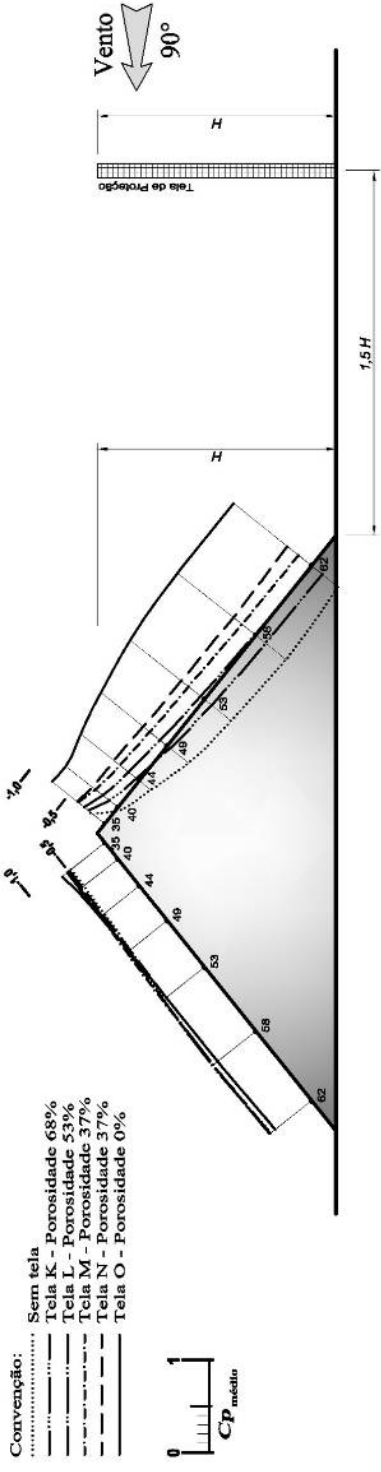
Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-SX



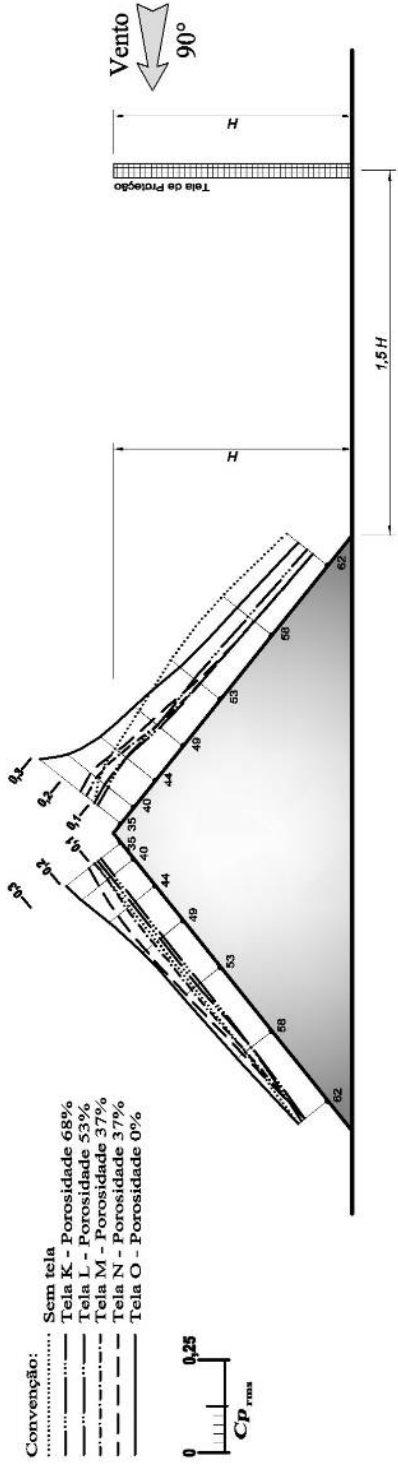
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-SX + EF-RX



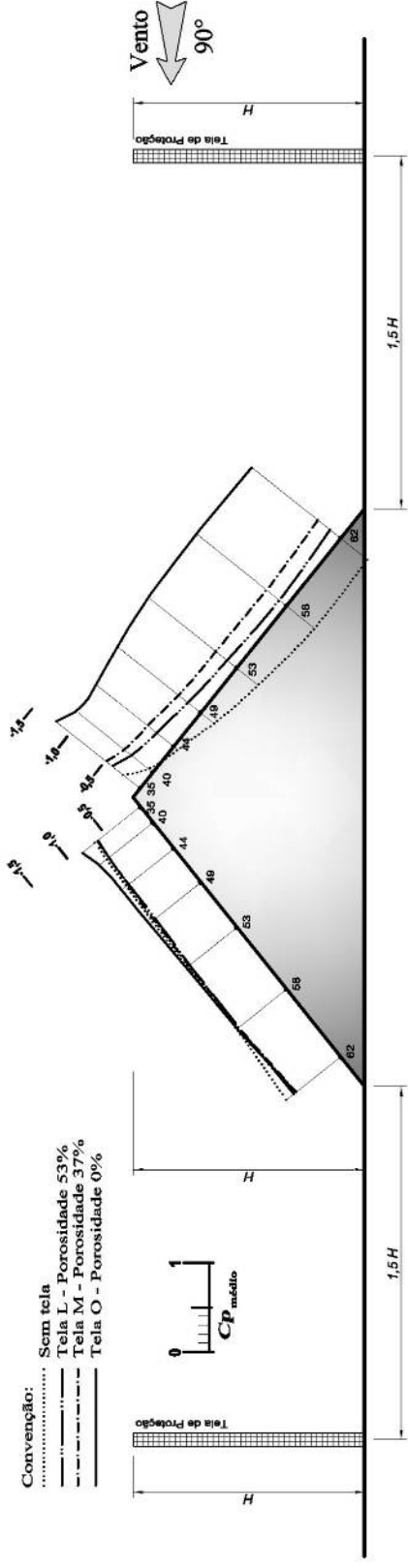
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-SY + EF-RY



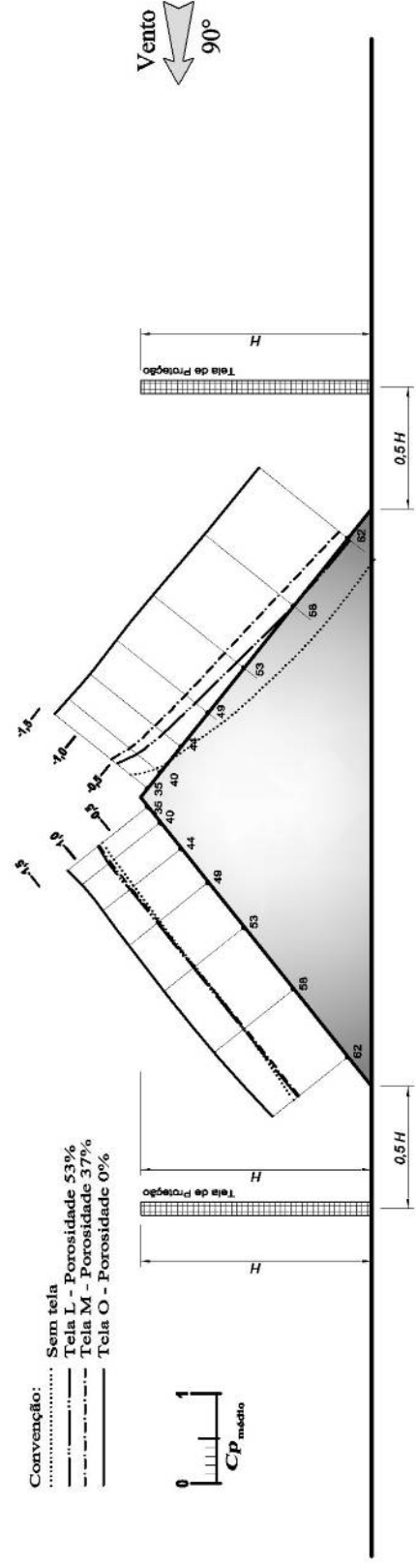
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-RY



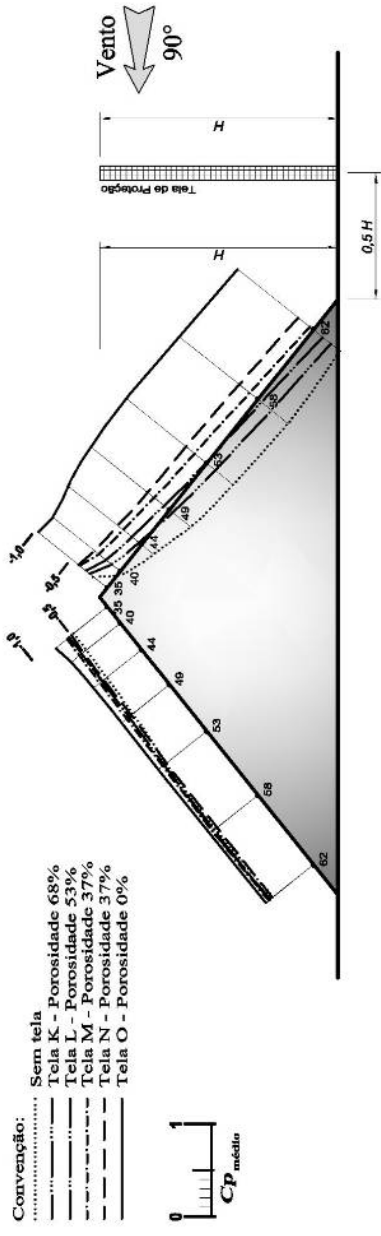
Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-RY



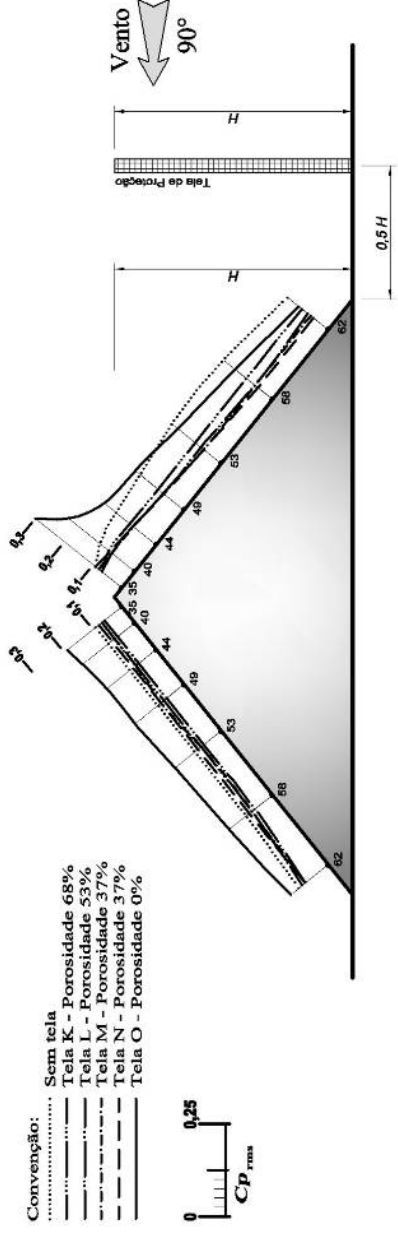
Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
 Configuração AB-RY + EF-RY



Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
 Configuração AB-RX + EF-RX



Perfis de pressão média na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-RX



Perfis de pressão rms na seção transversal para as diferentes porosidades de telas
Configuração AB-RX