

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

*AVALIAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO DO COMPORTAMENTO DA
CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM TERRENOS COMPLEXOS*

Jussara M. Leite Mattuella

Porto Alegre
2012

Jussara M. Leite Mattuella

**AVALIAÇÃO EM TÚNEL DO VENTO DO
COMPORTAMENTO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA
EM TERRENOS COMPLEXOS**

Tese 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 Doutor em Engenharia.

Porto Alegre
2012

Jussara M. Leite Mattuella

**AVALIAÇÃO EM TÚNEL DO VENTO DO
COMPORTAMENTO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA
EM TERRENOS COMPLEXOS**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para obtenção do título de DOUTORA EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de outubro de 2012.

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

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adrian Roberto Wittwer
Dr. pela Universidad Nacional Del Nordeste, UNN, Argentina

Prof.ª. Ângela Masuero
Dr.ª pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Prof. Joaquim Blessmann
Dr. pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), do Centro Técnico Aeroespacial (CTA),
São José dos Campos, São Paulo, Brasil

Prof. José Luis Vital de Brito
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Aos meus Pais

Jadir (*in memoriam*) e Maria Helena, a quem devo o melhor de mim.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador desta pesquisa Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, PhD, pelo aprendizado que me proporcionou;

Aos Professores da banca de avaliação, pelas suas diferenciais colaborações nesta pesquisa:

- Prof. Dr Adrian Roberto Wittwer;
- Prof Dra. Ângela Masuero;
- Prof. Dr. Joaquim Blessmann e
- Prof. Dr José Luis Vital de Brito;

À Prof. Dra Adriane Prisco Petry, pela sua cooperação em minha formação;

Aos colegas desta jornada no Laboratório, especialmente ao Dr. Mario Gustavo de Oliveira;

A minha filha Vivian Leite Mattuella, meu contínuo incentivo a avançar;

Ao meu marido Alberto Augusto Handel, pela parceria;

A minha família, na pessoa da minha irmã Ana Maria Leite Trevisan.

ENERGIA EÓLICA

Sopras, e ninguém te vê! És o mais invisível dos seres visíveis? Tua presença impõe-se a tudo, e sem ti, o que seria das narinas, que acolheram teu sopro no início dos séculos? Ainda hoje, tais narinas, animadas, te ocultam! Por vezes, com tanta artilosidade que, no sono de um bebê, ou no ressonar deleitoso de uma mulher que fez amor, quase podemos tocar-te! Os verdadeiros amantes não resistem a essa carícia: estendem a palma da mão, ou a delicadeza dos dedos, para se certificarem de que continuas em teu fogo sem brilho, porém tátil. E te tocam, como se penetrassem o mais íntimo das almas.

Sopras, e as velas se inflam! Sopras, e as asas se sustentam sobre o vácuo! Sopras, e, de súbito, as labaredas lambem as nuvens, e estas, impelidas por forças inauditas, percorrem os céus, açulando, como cães, os oceanos e os lagos. Sopras! Tudo responde aos teus clamores, aos teus murmúrios, Aos teus sussurros! Até mesmo a pomba do Dilúvio não poderia Ter trazido no bico o raminho de oliveira, se a tua doçura Não lhe tivesse amparado o fragílimo corpo frágil, naquela Manhã radiosa em que o arco-íris, pela primeira vez cingiu Com uma grinalda de cores a cabeça do Mundo!

Sopras, amado vento! Quando poderoso, acionas as forjas; quando humilde, ó silencioso ar, acaricias as corolas das flores, anunciando a chegada do Onipotente.

Sopras, e os navegadores zarpam, arriscando-se em suas caravelas. Avistam, no horizonte, vagos objetos, e lá, os aguardas, agitando as pesadas folhas das bananeiras! é teu vigor que os obriga a ir além de Taprobana, onde o cravo, a canela, o gengibre, lhes dão boas vindas. Vais com eles, sacudindo as sotainas de Francisco Xavier e Vieira, até aonde reluz o ouro, e onde reluzem as almas dos desamparados indígenas. Estás presente em tudo, até às desditas dos homens! Sem ti as bandeiras dos guerreiros não tingiram de vermelho o solo de nossa pátria, e nossa liberdade ainda estaria flutuando, à semelhança de um farrapo de poncho, no mastro de colonizadores cobiçosos.

Sopras, e a palavra voa, sem que ninguém possa cativar! É livre, como as pás de teus cataventos, que nutrem as utopias,

como tuas torres geradoras de energia eólica,
que não te escravizam, mas te pedem o braço generoso
de tua efêmera onipresença, imagem da Onipresença
do Criador.

Ó vento, ó ar, ó formas múltiplas e variadas em que te revelas!
Ó força que veio da boca de Deus, e continua na boca dos
homens! Força que fertiliza a inteligência dos homens, e lhes
ensina a respeitar a ordem estabelecida por Quem estabeleceu ,
em tudo número, peso e medida!

Sopras!

E nossos olhos se iluminam!

Sopras!

E nossas mãos
se multiplicam na engenharia
de tuas invisíveis mãos!

Sopras

Armando Trevisan
23.08.2007

RESUMO

MATTUELLA, J. M. L. *Avaliação em Túnel do Vento do Comportamento da Camada Limite Atmosférica em Terrenos Complexos*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A estrutura do vento varia de acordo com as características do terreno e com a rugosidade da superfície terrestre, desacelerando proporcionalmente sua intensidade de acordo com a proximidade do solo, o que determina a constituição da camada limite atmosférica (C.L.A.). As características do escoamento sobre e no entorno de características topográficas obtusas tais como morros são de grande interesse em muitas aplicações, especialmente aquelas ligadas à engenharia de vento. Esta pesquisa foca a investigação da C.L.A. sobre terrenos complexos, analisando a estrutura do escoamento turbulento, a separação e a recomposição do mesmo. Para tanto, dois métodos são empregados e comparados na presente investigação para identificar a influência da orografia complexa sobre o escoamento do vento: padrões ou códigos de carga de vento e análises experimentais em túnel de vento. Nove modelos experimentais de morros isolados, sendo quatro simétricos bidimensionais, quatro simétricos tridimensionais e um assimétrico, todos com a consideração de dois tipos de terreno, categoria I – plano e categorias III-IV – medianamente rugosas são analisados. A partir de uma simulação experimental da camada limite em túnel de vento, é possível parametrizar os efeitos do vento sobre terrenos complexos (MILLER, 1995). A definição de variáveis, tais como: o perfil de velocidade do vento, a intensidade de turbulência, os efeitos topográficos na velocidade do vento constituem-se em elementos fundamentais para cálculos estruturais de edificações situadas no entorno. Foram desenvolvidas simulações experimentais no túnel de vento de camada limite Prof. Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Na superfície do modelo assimétrico, na radial principal do mesmo, foram localizados nove perfis de medição, contendo cada um, vinte alturas de investigação. Os demais modelos tiveram como foco de análise o cume dos mesmos, também com perfis definidos nas mesmas alturas. As medições da velocidade do vento e da intensidade da turbulência foram procedidas por um sistema de anemometria de fio quente. Os dados obtidos em túnel de vento foram confrontados com expressões empíricas calculadas para os mesmos pontos segundo cinco códigos ou padrões de carga de vento, pontuando também as correlações entre os mesmos e entre estes com a norma brasileira NBR 6123 (1988). Os modelos, códigos ou padrões analisados foram: Jackson e Hunt (1975) e Davenport, Surry e Lemelin (1988), models e as normas a seguir nominadas: Norma Brasileira: cargas de vento em Edificações - NBR 6123 (1988); European Standard: Eurocode1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN TC 250: 2002; Australian/New Zealand Standard: Minimum Design Loads on Structures, AS/NZS 1170.2: 2002; Architectural Institute of Japan AIJ: 2004; American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95 (ASCE 7-95), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures; National Building Code of Canada, 2005, (NRCC 2005).

Além do estudo comparativo acerca da resposta estimada pelos códigos nominados, esta pesquisa constitui-se em um banco de dados de medições em pontos localizados nos morros nominados, em túnel de vento. O comparativo entre os padrões mostra a inexistência de uma harmonização entre os mesmos para a consideração dos parâmetros a serem empregues para o cálculo de cargas de vento. Estas diferenças na definição dos parâmetros básicos para o carregamento de vento em estruturas determinam grandes dificuldades na unificação de formatos recomendados na previsão das cargas de vento. Comparativamente aos dados experimentais, os padrões, em geral, mostram-se conservadores para os dois tipos de morros

analizados, simétrico e assimétrico, para os dois tipos de terreno, tanto considerando-se análises em 2D ou 3D.

Palavras-chave: camada limite atmosférica; terrenos complexos; experimentos em túnel de vento; códigos internacionais de carga de vento.

ABSTRACT

MATTUELLA, J. M. L. *Avaliação em Túnel do Vento do Comportamento da Camada Limite Atmosférica em Terrenos Complexos*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The structure of the wind varies with the characteristics of the terrain and roughness land surface, slowing its intensity proportionally according to the surrounding terrain, which determines the onset of boundary layer (ABL). The characteristics of the flow over and around topographic features such as hills are of great interest in many applications, especially those related to wind engineering. From an experimental simulation of the boundary layer wind tunnel, it is possible to parameterize the effects of wind over complex terrain (MILLER, 1995). The definition of variables, such as the profile of wind speed, the turbulence intensity, the topographic effects on wind speed are key elements in structural calculations for buildings situated around the area. This research focuses on the investigation of the ABL complex terrain conditions, analyzing the structure of turbulent flow and characterization of separation and reattachment of the flow. Experimental simulations were developed in the wind tunnel of the atmospheric boundary layer Prof. Joaquim Blessmann, Federal University of Rio Grande do Sul in nine models of hills, four symmetrical two-dimensional, four- symmetrical three-dimensional and one asymmetrical, all considering two types of terrain, category I - plan and Category III-IV- moderately rough. The surface of the asymmetric model was measured in nine profiles plotted on the main radial of the hill, with twenty heights each, and the other models were examined at top of the hill. The measurements were performed with a system of hot wire anemometry to measure the wind velocity and intensity of turbulence. The identification of the data obtained in the wind tunnel were confronted with empirical expressions for the same points, in order to establish the correlations between patterns and among these with NBR 6123 (1988). Two models and five codes of wind loads are analyzed: Jackson and Hunt (1975) and e Davenport, Surry e Lemelin (1988) Models and Brazilian Association of Technical Standards: Wind Load on Buildings, NBR 6123 (1988); European Standard: Eurocode1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN TC 250: 2002; Australian/New Zealand Standard: Minimum Design Loads on Structures, AS/NZS 1170.2: 2002; Architectural Institute of Japan AIJ: 2004; American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95 (ASCE 7-95), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures; National Building Code of Canada, 2005, (NRCC 2005) codes. This study focuses not only the comparison of the response estimated by international codes nominees, but also a data bank of wind tunnel data to validate this tool based on empirical expressions. The comparison of the patterns shows a lack of consideration for international harmonization of the parameters to be employed for the calculations of wind loads. These differences in defining the basic parameters for the wind loading on structures determines difficulties to unify the formats recommended in the prediction of wind loads. Compared to the experimental data, the patterns will generally show up conservative for both types of mounts analyzed, symmetrical and asymmetrical, for both types of terrain, both considering 2D or 3D.

Keywords: atmospheric boundary layer; complex terrain; wind-tunnel experiments; international wind load codes.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 - Locação de seções transversais para análise dos perfis de vento em um talude com platô	51
Tabela 1 - Estudo comparativo entre os resultados da velocidade incremental do vento no cume do morro sob o enfoque de três métodos: metodologias de campo, modelos matemáticos e modelos em túnel de vento (TEUNISSEN, 1983).....	54
Tabela 2 - Variação dos limites de declividade (%) entre as normas ASCE/SEI 7, AS/NZS 1170.2, AIJ:2004, CEN TC 250	56
Figura 2 - Formação da camada limite (adaptado de BLESSMANN, 1990).....	60
Figura 3 - Modelo urbano de Maruyama e Ishizaki (1988) em túnel de vento.....	63
Figura 4 - Crescimento da camada limite em modelos em escala urbanos, segundo Maruyama e Ishizaki (1988)	64
Figura 5 - Camadas-limite para diferentes categorias de exposição (BLESSMANN, 1995)...	65
Figura 6 - Circulações do tipo brisa entre terra e o mar no dia (a) e à noite (b) (OKE,1987)..	67
Figura 7 - Esboço da camada limite urbana e a pluma urbana para o dia (a) e noite (b) (STULL, 1988)	68
Figura 8 - Modelo de Jackson e Hunt (1975) para um morro sinusoidal.....	72
Figura 9 - Modelos de escoamento sobre um morro isolado (STULL, 1988, p. 602).....	73
Figura 10 - Esquema representativo dos fenômenos da separação do escoamento, região de recirculação e turbulência e ponto de recolamento do escoamento.....	74
Figura 11 - Esquema representativo dos fenômenos da separação do escoamento e esteira do vento (BLESSMANN, 1990).....	75
Figura 12 - Estratificação vertical de um escoamento sobre um morro baixo e isolado (HUNT; LEIBOVICH; RICHARDS, 1988)	76
Figura 13 - Estratificação vertical de um escoamento sobre um morro baixo e isolado (Jackson e Hunt, 1975)	77
Figura 14 - Diagramação do fenômeno da separação e recolamento de um escoamento em um modelo em escala em túnel de vento.	82
Figura 15 - Modelos de perfis de seção transversal de cumes (NEFF; MERONEY, 1998)	83
Figura 16 - Modelos de cortes em cumes sinusoidais com declividade 1:3 (NEFF e MERONEY, 1998)	83
Figura 17 - Visualização de um escoamento para diferentes perfis de seção transversal de um morro isolado com número de Reynolds $Re = 8 \times 10^4$ e as correspondentes regiões de recirculação (NEFF e MERONEY, 1998)..	84
Figura 18 - Perfil vertical da velocidade do vento em uma colina baixa e isolada.	86
σ_u/V_h , σ_v/V_h e σ_w/V_h com apreciação da velocidade incremental do vento (ISHIRARA; HIBI; OIKAWA, 1999)	86
Figura 19 - Modelos de escoamentos bidimensionais sobre morros isolados com diferentes alturas, segundo Arya (1988).....	88
Figura 20 - Esquema do escoamento sobre cume bi-dimensional com uma elevada inversão a barlavento (HUNT e SIMPSON, 1982).....	89
Figura 21- Modelagem de separação e recolamento do escoamento em dois tipos de taludes íngremes (DERICKSON et al., 2004)	90
Figura 22 - Perfis da velocidade vertical do vento em um escoamento ascendente sobre um talude (CORBETT, 2007).....	91
Figura 23 - Linhas de corrente de um escoamento no sentido descendente em um talude (CORBETT, 2007).....	92

Figura 24 - Perfis da velocidade vertical do vento em um escoamento descendente sobre um talude (CORBETT, 2007).....	92
Figura 25 - Simbologia das equações de Bowen (1983) para o caso de taludes	93
Tabela 3 - Comparação entre as configurações dos elementos de rugosidade empregados em vários estudos.....	96
Figura 26 - Representação das linhas de corrente de um escoamento sobre uma área complexa entre duas elevações (CORBETT, 2007).....	100
Figura 27- Modelo em escala de um terreno complexo típico empregado para experimentos em túneis de vento (DERICKSON et al., 2004)	101
Figura 28 - Apresentação esquemática da velocidade incremental do vento em cumes e taludes - Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988)	108
Figura 29 - Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988).....	108
Tabela 4 - Valores dos parâmetros: ΔV máx , n e a, para morros assimétricos analisados tridimensionalmente e cumes, bidimensionalmente (ou vales com altura - d negativa).	110
Tabela 5 - Valores aproximados dos parâmetros: ΔV máx , a, n e p para taludes.	110
Figura 30 - Isopletras da velocidade básica - V_o (m/s) (NBR 6123)	112
Figura 31- Fator topográfico $S_1(z)$ para morros - NBR 6123 (1988)	113
Figura 32 - Fator topográfico $S_1(z)$ para taludes- NBR (1988)	113
Tabela 6 - Parâmetros meteorológicos.	115
Tabela 7 - Fator S_2	116
Tabela 8 - Valores mínimos do fator estatístico S_3	117
Figura 33- Zona considerada para os efeitos topográficos-morros e vales (CEN TC 250: 2002).	119
Figura 34 - Zonas consideradas para os efeitos topográficos em taludes (CEN TC 250:2002).	119
Tabela 9 - Categorias de terreno e parâmetros relacionados (CEN TC 250:2002).	120
Figura 35 - Efeitos topográficos de morros e cumes (AS/NZS 1170.2:2002).	127
Figura 36 - Efeitos topográficos em taludes (AS/NZS 1170.2:2002).	127
Figura 37 - Efeitos da velocidade incremental do vento na zona de separação (AS/NZS 1170.2:2002).	128
Figura 38 - Isopletras da velocidade básica do vento no Japão, média de 10 min a 10 m do solo, em m/s (AIJ, 2004).....	129
Tabela 10 - Categorias de terreno (AIJ: 2004)	130
Tabela 11 - Parâmetros determinantes de $E_r - z_b, z_G, p^*$ (AIJ:2004).	131
Figura 39 - Parâmetros considerados no cálculo do fator topográfico de morros (AIJ:2004).	131
Figura 40 - Parâmetros considerados no cálculo do fator topográfico de taludes (AIJ: 2004).	131
Tabela 12 - Parâmetros determinantes de $S_1 - cumes$ (AIJ: 2004).	133
Tabela 13 - Parâmetros determinantes de $S_1 - taludes$ (AIJ:2004).	133
Figura 41 - Zona efetivamente considerada para efeitos da influência da elevação no escoamento (AIJ: 2004).	135
Tabela 14 - Parâmetros determinantes de $E_1 - cumes$ (AIJ:2004).....	137
Tabela 15 - Parâmetros determinantes de $E_1 - taludes$ (AIJ:2004).....	138
Tabela 16 - Valores típicos para o fator de direcionalidade K_d . (AIJ:2004).....	139
Tabela 17 - Categoria de ocupação de edifícios e outras estruturas para vento (AIJ:2004)...	140
Tabela 18 - Fator de Importância (AIJ:2004).....	140
Tabela 19 - Coeficiente de exposição de pressão de velocidade K_h ou K_z	142
Tabela 20 - Constantes de exposição do terreno	143

Figura 42 - Cumes bidimensionais ou morros assimétricos tridimensionais (ASCE/SEI:2006).	146
Figura 43 - Taludes (ASCE/SEI:2006).	146
Tabela 21 - Multiplicador topográfico para exposição do tipo C. (ASCE/SEI:2006).	146
Figura 44 - Simbologia do aspecto topográfico considerado na ASCE/ SEI 7-05 (NGO e LETCHFORD, 2008).	148
Tabela 22 - Parâmetros de cálculo da velocidade incremental do vento sobre as características topográficas.	148
Tabela 23 - Fatores de Exposição C_e .	152
Figura 45 - Velocidade incremental do vento sobre morros (NBCC, 2005).	154
Figura 46 – Velocidade incremental do vento sobre taludes (NBCC, 2005).	154
Tabela 24 - Parâmetros para máxima velocidade incremental do vento sobre baixos morros.	155
Tabela 25 - Comparação das velocidades básicas do vento nas normas em questão.	157
Tabela 26 - Parâmetros para máxima velocidade incremental do vento sobre baixos morros.	159
Tabela 27 - Variação dos limites de inclinação entre normas.	160
Tabela 28 - Região de aplicação dos efeitos da velocidade incremental do vento.	161
Tabela 29 - Comparação entre as configurações dos elementos de rugosidade empregados em vários autores.	163
Figura 47- Simulação da C.L.A. em túnel de vento com profundidade total e parcial (KOZMAR, 2011).	166
Figura 49 - Simuladores elípticos de Counihan (1969) empregados no túnel Prof. Jacek P. Gorecki na Universidad Nacional del Nordeste, na Argentina (Publicação de LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004).	169
Figura 50 - Simuladores empregados no túnel Prof. Joaquim Blessmann no Laboratório de Aerodinâmica da UFRGS, Porto Alegre, RS. À esquerda-superior, método de barreira, do tipo grelha e agulhas. Os dois exemplos inferiores são métodos de rugosidade, anteparos horizontais e agulhas.	169
Figura 51 - Método de rugosidade e barreira com perfurações projetado pelo Prof. Joaquim Blessmann no túnel de vento da UFRGS (Figura da publicação de LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004).	170
Figura 52 - Vista externa lateral do túnel Prof. Joaquim Blessmann.	172
Figura 53 - Túnel de vento Prof Joaquim Blessman, da UFRGS (BLESSMANN, 1982).	173
Figura 54 - Medições com o Experimento I - área complexa real.	174
Figura 55 - Funcionamento anemômetro de fio quente.	175
Figura 56 - Detalhe da sonda empregada na medição.	175
Figura 57 - Perfil vertical das velocidades médias medidas no ponto 1 do morro assimétrico- Experimento II comparado ao perfil vertical do vento de categoria I para 3D.	177
Figura 58 - Perfil vertical intensidade da turbulência medidas no ponto 1 do morro assimétrico do Experimento II comparado ao perfil vertical da intensidade da turbulência para um vento da categoria I.	178
Figura 59 - Sistema StreamLine 90 N 10.	179
Figura 60 - Janela do Sistema StreamLine 90 N 10 no momento de calibração do mesmo para uso nas medições.	179
Tabela 30 - Dimensões dos modelos bidimensionais do Experimento I.	180
Figura 61 - Modelos bidimensionais, em escala -vista superior e a localização dos pontos medidos.	181
Tabela 31 - Dimensões dos modelos em escala tridimensionais do Experimento I.	181
Figura 62 - Ponto medido-Modelo A - corte e vista superior.	182

Figura 63 - Ponto medido-Modelo B - corte e vista superior.....	182
Figura 64 - Ponto medido-Modelo C - corte e vista superior.....	182
Figura 65 - Ponto medido-Modelo C - corte e vista superior.....	184
Figura 67 - Modelo A - medição bidimensional.....	184
Figura 68 - Modelo A - medição tridimensional.....	184
Figura 69 - Modelo B - medição bidimensional.....	184
Figura 70 - Modelo B - medição tridimensional.....	184
Figura 71 - Modelo C - medição bidimensional.....	185
Figura 72 - Modelo C - medição tridimensional.....	185
Figura 73 - Modelo D - medição bidimensional.....	185
Figura 74 - Modelo D - medição tridimensional.....	185
Figura 75 - Locação dos pontos de medição no Experimento II - área complexa real integralizada por morro isolado e assimétrico, três pequenos morros baixos e simétricos e três pontos do entorno em planta baixa e em corte.....	186
Figura 76 - Coordenadas dos pontos de medição locados na diretriz do morro isolado assimétrico principal incluso na área complexa real.....	186
Figura 77 - Fixação modelo, diretriz de locação dos pontos de medição no morro principal e elementos de barreira empregados no Experimento II - área complexa real.....	187
Figura 78 - Área complexa experimental contendo morro isolado e assimétrico, e mais três pontos vistos no momento do experimento no túnel Prof ^o . Joaquim Blessmann da UFRGS.....	187
Figura 79 - Aplicação dos modelos analíticos das Normas NBR 6123(1988), EUROCODE- CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, AS/NZS: 1170.2:2002, ASCE 7-95:2005 e NBCC:2005 a um terreno plano, sem rugosidade.....	188
Tabela 32 - Velocidades de vento medidas no cume dos modelos A, B, C e D, em 21 alturas cada para perfil de vento $p = 0,11$ - área plana e sem rugosidade, para medição 2D, normalizadas a 275 m.....	189
Tabela 33 - Velocidades de vento medidas no cume dos modelos A, B, C e D, em 21 alturas cada para perfil de vento $p = 0,11$ - área plana e sem rugosidade, para medição 3D, normalizadas a 275 m.....	190
Tabela 34 - Velocidades de vento medidas no cume dos modelos A, B, C e D, em 21 alturas cada para perfil de vento $p = 0,23$ - área com pouca rugosidade, para medição 2D, normalizadas a 275 m.....	191
Tabela 35 - Velocidades de vento medidas no cume dos modelos A, B, C e D, em 21 alturas para perfil de vento $p = 0,23$ - área com pouca rugosidade, para medição 3D, normalizadas a 275 m.....	192
Figura 95 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, modelo D, cume, categorias III-IV, $p = 0,23$	199
Tabela 36 - Velocidades de vento medidas nos pontos assinalados da área complexa em 20 alturas para cada ponto, para o perfil de vento $p = 0,11$ - área plana e sem rugosidade normalizados a 275 m.....	201
Tabela 37 - Velocidades de vento medidas nos pontos assinalados da área complexa em 20 alturas para cada ponto, para o perfil de vento $p = 0,23$ - área com pouca rugosidade normalizadas a 275 m.....	202
Figura 96 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m- morro assimétrico, ponto 01, categoria I, $p = 0,11$	203
Figura 97 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m, morro assimétrico, ponto 01, categorias III-IV, $p = 0,23$	204
Figura 98 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m- morro assimétrico, ponto 02, categoria I, $p = 0,11$	204

Figura 99 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m, morro assimétrico, ponto 02, categorias III-IV, $p = 0,23$.	205
Figura 100 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 03, categoria I, $p = 0,11$.	206
Figura 101 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 03, categorias III-IV, $p = 0,23$.	206
Figura 102 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 04, categoria I, $p = 0,11$.	207
Figura 103 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 04, categorias III-IV, $p = 0,23$.	209
Figura 104 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 05, categoria I, $p = 0,11$.	208
Figura 105 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 05, categorias III-IV, $p = 0,23$.	211
Figura 106 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 06, categoria I, $p = 0,11$.	209
Figura 107 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 06, categorias III-IV, $p = 0,23$.	212
Figura 108 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 07, categoria I, $p = 0,11$.	209
Figura 109 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 07, categorias III-IV, $p = 0,23$.	210
Figura 110 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 08, categoria I, $p = 0,11$.	211
Figura 111 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 08, categorias III-IV, $p = 0,23$.	214
Figura 112 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 09, categoria I, $p = 0,11$.	212
Figura 113 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-morro assimétrico, ponto 09, categorias III-IV, $p = 0,23$.	212
Figura 114 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m-ponto 10, em solo, categoria I, $p = 0,11$.	212
Figura 115 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m, ponto 10, em solo, categoria III-IV, $p = 0,23$.	213
Figura 116 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m, ponto 11, em solo, categoria I, $p = 0,11$.	214
Figura 117 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m, ponto 11, em solo, categorias III-IV, $p = 0,23$.	214
Figura 118 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m, ponto 12, em solo, categoria I, $p = 0,11$.	214
Figura 119 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, normalizada a 275 m, ponto 12, em solo, categoria III-IV, $p = 0,23$.	215
Tabela 38 - Duração da velocidade e o tempo de recorrência de cada padrão mencionado	215
Tabela 39 - Parâmetros para velocidade incremental do vento sobre morros-ASCE	224
Tabela 40 - Valores dos multiplicadores vigentes e testados para multiplicador “x” do fator topográfico(NBR 6123)	225
Tabela 41 - Valores dos multiplicadores vigentes e testados para multiplicador “x” do fator topográfico segundo ASCE	228
Tabela 42 - Valores dos multiplicadores vigentes e testados para o valor de “x” do fator topográfico constante na equação 97.	229

LISTA DE SIGLAS

MEASNET	Measuring Network of Wind Energy Institutes
PIV	Particle Image Velocimetry
WASP	Wind Atlas Analysis and Application Program
RAMSIM	RisØ Atmospheric Mixed Spectral – Integration Model
NOABL	NOABL Wind Map
NBR 6123	Norma Brasileira Registrada – Forças devidas ao vento em edificações
AIJ: 2004	Architectural Institute of Japan AIJ: 2004
AS/NSZ 1170.2	Australian/New Zealand Standard: Minimum Design Loads on Structures
CEN TC 250	European Standard: Eurocode1: Basis of Desig and Actions on Structures
ASCE/SEI 7-05	American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures;
NBCC	National Building Code of Canada
C.L.A.	Camada Limite Atmosferica
k-ε	Modelo de Turbulência
k-ω	Modelo de Turbulência
k-1	Modelo de Turbulência

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade	Descrição
α	graus	ângulo de incidência do vento, medido entre a direção do vento e o lado maior da edificação
α	adimensional	expoente da lei de potência(capítulo 3)
γ	adimensional	fator de atenuação vertical (ASCE/SEI 7-05)
γ	N/m ³	peso específico
δ	m	altura da camada limite
ΔS	adimensional	razão da velocidade incremental
$\Delta V (x,z)$	m/s	velocidade incremental do vento segundo eixos x e y
ΔV	m/s	velocidade incremental do vento
$\Delta V_{\text{máx}}$	m/s	velocidade incremental do vento no ponto máximo
ΔV_h	adimensional	velocidade incremental do vento devido à topografia-Modelo de Jackson e Hunt
ΔV_r	adimensional	velocidade incremental do vento devido a rugosidade do terreno- Modelo de Jackson e Hunt
$\Delta V(z)$	m/s	velocidade incremental do vento
θ	%	inclinação média do talude ou encosta do morro
k	adimensional	constante de von Kármán

ν	m^2/s	viscosidade cinemática do escoamento
λ	%	densidade de área rugosa
λ_f	adimensional	área frontal por unidade de área plana
$\lambda_f = A_f/A_p$	adimensional	razão de elementos de rugosidade: na área frontal/área plana
$\lambda = A_f/A_p$	adimensional	razão dos elementos de rugosidade da área frontal por área plana
μ	N s/m ² ou kg/(m/s)	viscosidade
μ	adimensional	fator de atenuação horizontal (ASCE/SEI 7-05)
μ^*/U_δ	adimensional	razão da velocidade de cisalhamento
ρ	kg/m ³	massa específica do fluido
σ_u	m/s	desvio padrão da componente de rajada do vento no eixo "u" (AS/ NZS 1170.2:2002)
σ_v	m/s	desvio padrão da componente de rajada do vento no eixo "v"(AS/ NZS 1170.2:2002)
σ_w	m/s	desvio padrão da componente de rajada do vento no eixo "w"(AS/ NZS 1170.2:2002)
$\sigma^*(x,z)$	adimensional	forma da característica topográfica, depende da forma do morro e varia com a altura e posição horizontal relativa ao cume
$\sigma(z)$	m/s	desvio padrão da componente da velocidade de rajada (AS/NZS1170.2:2002)
φ	%	porosidade
∞	adimensional	infinito

f	m/s^2	extensão horizontal percorrida pelo vento -“fetch”
f	m/s^2	parâmetro de Coriolis, depende da velocidade de rotação da terra, latitude e longitude, tomado como 10^{-4} (AS/ NZS 1170.2:2002)
A	m^2	área
A	adimensional	parâmetro que compõe o fator de locação topográfica (CEN TC 250: 2002)
A_F	mm	área frontal
A_P	mm	área plana
B	m	distância entre o mais alto ponto do morro e o valor médio da altura do morro, no sentido contrario ao vento (Modelo de Davenport)
B	adimensional	parâmetro que compõe o fator de locação topográfica (CEN TC 250: 2002)
B	mm	dimensão elemento rugosidade na direção "y"
C	adimensional	parâmetro que compõe o fator de locação topográfica (CEN TC 250: 2002)
C	adimensional	constante que depende da forma dos elementos de rugosidade. Lettau recomenda = 0,5
C_e	adimensional	fator de exposição que define a variação da pressão da velocidade com a altura
C_e	adimensional	fator de exposição (NBCC:2005)
C_e^*	adimensional	fator de exposição modificado (NBCC:2005)
C_g	adimensional	fator efeito de rajada (NBCC:2005)
C.L.A.	m	camada limite atmosférica

C_1	adimensional	parâmetro topográfico (AIJ: 2004)
C_2	adimensional	parâmetro topográfico (AIJ:2004)
C_3	adimensional	parâmetro topográfico (AIJ:2004)
C_{i1}	adimensional	parâmetro experimental, depende da forma topográfica (AIJ: 2004)
C_{i2}	adimensional	parâmetro experimental, depende da inclinação (AIJ: 2004)
C_{i3}	adimensional	parâmetro experimental, depende da locação da área (AIJ: 2004)
E	adimensional	fator perfil da velocidade do vento(AIJ:2004)
E_g	adimensional	fator topográfico (AIJ: 2004)
E_{gl}	adimensional	fator topográfico da turbulência (AIJ: 2004)
E_H	adimensional	fator do perfil da velocidade do vento em uma altura “d” (AIJ:2004)
E_I	adimensional	fator topográfico para desvios padrão da flutuação da velocidade do vento (AIJ: 2004)
E_r	adimensional	fator de exposição (AIJ: 2004)
F	hertz	frequência
F_c	adimensional	número crítico de Froude
F_r	adimensional	fator de rajada
F_l	adimensional	número de Froude
G	adimensional	fator de rajada (ISHIZAKI, 1983)

H^*	mm	altura da agulha
H	m	altura característica
I	m/s	componente do vetor de rajada
I_*	adimensional	fator de importância (ASCE/SEI 7-05)
I_1	%	intensidade da componente longitudinal da turbulência
I_z	%	intensidade da turbulência
I_{rZ}	%	intensidade da turbulência na altura z em categoria de terreno plano (AIJ: 2004)
$I_v(z)$	%	intensidade longitudinal da turbulência
K_d	adimensional	fator de direcionalidade do vento (ASCE/SEI 7-05)
K_D	adimensional	fator de direção do vento (AIJ: 2004)
K_h	adimensional	coeficiente de exposição de pressão de velocidade (ou K_z)
K_z	adimensional	coeficiente de exposição de pressão de velocidade (ASCE/SEI 7-05)
K_{zt}	adimensional	fator topográfico (ASCE/SEI 7-05)
K_1	adimensional	parâmetro relacionado ao tipo de topografia, à forma da característica topográfica e ao efeito da velocidade incremental máxima do vento (ASCE/SEI 7-05)
K_2	adimensional	parâmetro de atenuação horizontal do terreno (ASCE/SEI 7-05)
K_3	adimensional	parâmetro de atenuação vertical do terreno (ASCE/SEI 7-05)
L	m	comprimento característico do morro na direção do escoamento

L	mm	dimensão do elemento de rugosidade na direção do escoamento (Capítulo 3)
L_1^*	m	maior comprimento entre " $0,36 L_u$ " e " $0,4 d$ " (AS/ NZS 1170.2:2002)
L_1	m	distância a partir do cume a barlavento (AIJ:2004)
L_2^*	m	meio-comprimento horizontal do morro entre o eixo vertical situado no cume e o fim do morro (AS/ NZS 1170.2:2002)
L_2	m	distância a partir do cume a sotavento (AIJ:2004)
L_1^*	m	escala do comprimento
L_d	m	comprimento horizontal do morro, a sotavento entre o eixo vertical situado no cume até o fim do morro (CEN TC 250, 2002)
L_e	m	comprimento efetivo do declive (CEN TC 250: 2002)
L_h	m	metade do comprimento horizontal do declive a barlavento (CEN TC 250) e a distância horizontal a partir da cume morro até o ponto a barlavento onde a altura da característica topográfica é igual a $d/2$
L_s	m	distância horizontal a partir do cume ao ponto a barlavento onde a altura da elevação é $d/2$. Comprimento horizontal entre eixo vertical que passa no cume e a meia altura do morro (AIJ: 2004)
L_t	m	comprimento total do lado menor do morro-Modelo Davenport, Surry e Lemelin (1988)
L_u	m	extensão horizontal do declive a barlavento (CEN TC 250:2002)
M_h	adimensional	multiplicador forma do morro (AS/NSZ:2002)
M_t	adimensional	multiplicador topográfico (AS/NSZ:2002)
M_{zt}	adimensional	multiplicador terreno altura (AS/NSZ:2002)

\hat{M}_{zt}	adimensional	razão topográfica de rajada (AIJ: 2004) (ASCE/SEI 7-05)
N	Hertz	frequência de Brunt-Vaisala: frequência natural da gravidade na estratosfera
P_a	N /m ²	unidade de pressão estática: Pascal
R_e	adimensional	número de Reynolds
S	m ²	seção transversal do elemento de rugosidade
S_1	adimensional	fator topográfico (NBR 6123)
S_2	adimensional	fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e dimensões da edificação ou parte desta, em consideração (NBR 6123)
S_3	adimensional	fator estatístico- grau de segurança requerido e a vida útil da edificação (NBR 6123)
T	minutos	período de 10 minutos
U_H	m/s	velocidade básica do vento, obedece a distribuição das isopletas da velocidade básica do vento (AIJ: 2004)
U_s	m/s	velocidade de escoamento livre
V	m ³	volume
V_a	m/s	velocidade de aproximação do vento
V_b	m/s	velocidade do vento no pé do talude
V_c	m/s	velocidade do vento próximo ao cume
V_d	m/s	velocidade do vento a barlavento
ΔV_h	m/s	velocidade incremental do vento devido a topografia

V_k	m/s	velocidade característica do vento (NBR 6123). Em condições normais de pressão corresponde a (1 atm =1013,2 mbar=101320 Pa) e de temperatura (15°C).
V_o	m/s	velocidade básica do vento, máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, que pode ser excedida, em média, uma vez em 50 anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano (NBR 6123)
V_o	m/s	velocidade básica do vento a 10 m de altura acima do terreno (NBR 6123)
$V_o(z)$	m/s	velocidade do vento na cota "z"
V_H	m/s	velocidade do vento para projeto (AIJ: 2004)
V_∞	m/s	escoamento não perturbado
$V(z)$	m/s	velocidade do vento na altura "z"
$V_{10,II}(10)$	m/s	velocidade média do vento sobre 10 min, a 10 m de altura acima do nível do solo em um terreno de categoria II, isto é um terreno plano e aberto
$V^*_{10,II}(10)$	m/s	velocidade básica do vento, máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, que pode ser excedida, em média, uma vez em 100 anos, a 10 m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano (AIJ:2004)
$V^{**}_{10,II}(10)$	m/s	velocidade média do vento em 10 min a 10 m de altura acima nível solo em um terreno de categoria II, isto é um terreno plano e aberto com vegetação baixa tal como grama e obstáculos isolados separados em uma distância mínima de 20 vezes a altura do obstáculo, com um período de retorno de 50 anos
V_{ref}	m/s	velocidade de referência
$\bar{V}(z)$	m/s	velocidade média do vento sobre 10 min na altura z
$\bar{V}_{(10)}$	m/s	velocidade média, sobre 10 min
\bar{V}_{10}	m/s	velocidade média, sobre 10 min (AIJ:2004)

$\hat{V}_{3,C}^2(10)$	m^2/s^2	velocidade de rajada de 3s, ao quadrado, a 10m da superfície do solo em um terreno Tipo C
$\hat{V}_{3,C}(10)$	m/s	velocidade de rajada de 3s, a 10m da superfície do solo em um terreno Tipo C
$\hat{V}_n(z)$	m/s	velocidade de rajada na altura "z" acima do terreno (ASCE/SEI 7-05).
$\hat{V}(z)$	m/s	velocidade de rajada na altura "z" acima do terreno (AS/ NZS 1170.2: 2002)(AIJ:2004)(ASCE/SEI 7-05)
\hat{V}_{10}	m/s	velocidade média a 10 m acima do solo
$\hat{V}(10)$	m/s	velocidade de rajada a 10 m acima do solo (CEN TC 250)
$\hat{V}_{2-3}(z)$	m/s	velocidade de rajada de vento, média sobre 2-3 segundos na altura "z" (AIJ:2004)
$\hat{V}_{2-3,II}(10)$	m/s	velocidade de rajada de vento, média sobre 2-3 segundos na altura "z", em um terreno Categoria II
$\hat{V}_{2-3,II}(z)$	m/s	velocidade de rajada de vento, média sobre 2-3 segundos na altura "z" em um terreno categoria II
a	adimensional	constante do cálculo da velocidade incremental do vento - ΔV segundo Davenport, Surry e Lemelin (1988)
b	m	menor dimensão horizontal de uma edificação, dimensão da peça estrutural segundo a direção do vento ou parâmetro meteorológico
c_p	adimensional	coeficiente de pressão externa medido sobre a área da superfície considerada
c_p	adimensional	coeficiente de pressão externa medida sobre a área da superfície considerada (NBCC,2005)
c_{pi}	adimensional	coeficiente de pressão interna (NBCC,2005)
c_{pi}	adimensional	coeficiente de pressão interna: " $c_{pi} = \Delta p_i / q$ "
$c_r(z)$	m	fator de rugosidade (CEN TC 250:2002)

$c_t(z)$	adimensional	fator topográfico (CEN TC 250:2002)
d_*	m	altura do elemento de rugosidade (Lettau)
d	m	altura vertical máxima do morro desde o cume até a base do mesmo
$d/2$	m	meia altura vertical do morro, desde o cume até a base do mesmo
h	m	altura
h_i	m	altura de influência (segundo BLESSMANN,1995)
k_1	adimensional	parâmetro que depende do tipo de topografia, inclinação e exposição do terreno
k_1^*	adimensional	fator de turbulência (CEN TC 250:2002)
k	m/s	componente do vetor rajada
k_r	adimensional	fator que varia de acordo com a categoria terreno (CEN TC 250:2002)
k_{rw}	adimensional	fator de conversão para o período de recorrência considerado (AIJ: 2004)
n	adimensional	constante do cálculo da velocidade incremental do vento - ΔV segundo Davenport, Surry e Lemelin (1988)
p	adimensional	expoente da lei de potência (NBR 6123) (ASCE/SEI 7-05)
p^*	N /m ²	pressão externa atuando estaticamente e na direção normal à superfície, tanto como uma pressão dirigida para a superfície ou como sucção dirigida no sentido contrário (NBCC, 2005)
p^*	adimensional	parâmetro que determina o fator de exposição E_r (AIJ:2004)
p^{**}	adimensional	coeficiente de redução da velocidade incremental do vento.

p_i	N/m^2	pressão interna específica atuando estaticamente e na direção normal à superfície, tanto a sobrepressão (dirigida para fora) como a sucção (dirigida para dentro).
q	N/m^2	pressão dinâmica do vento. Corresponde à velocidade característica - V_k
q	N/m^2	pressão da velocidade de referência (Davenport e NBCC, 2005)
q_z	N/m^2	pressão de velocidade (ASCE/SEI 7-05)
r	adimensional	ponto de um escoamento - coordenadas x,y
s	adimensional	fator de locação topográfica
t	seg	intervalo de tempo para a determinação da velocidade média do vento
t	seg	período de tempo (AIJ: 2004).
u^*	m/s	velocidade de atrito ou fricção.
u	m/s	velocidade de um fluido em um ponto genérico
u_o	m/s	velocidade de referência no escoamento livre, não perturbado por obstáculos
\overline{uw}	m^2/s^2	tensões de Reynolds
x	m	comprimento a barlavento ou a sotavento a partir do eixo vertical que passa no cume da elevação
x	m	comprimento horizontal (ASCE/SEI 7-05)
x	m	comprimento horizontal entre o ponto de interesse e o ponto de máxima altura no "plano H" onde "x=0".
x_*	m	<i>fetch</i> - extensão horizontal percorrida pelo vento

y	m	distância da parede
z	m	altura ou cota acima do nível do solo local (NBR 6123)
z_b	m	parâmetro de exposição -altura da característica topográfica (AIJ, 2004)
z_c	m	parâmetro de exposição -altura da característica topográfica quando " z_b " for menor que " z_c "(AIJ, 2004)
z_d	m	deslocamento do plano zero
z_g	m	altura gradiente: altura da camada limite atmosférica (C.L.A.)
z_o	m	comprimento de rugosidade
$Z_{o, II}$	m	comprimento de rugosidade na Categoria 2
z_{o1}	m	comprimento de rugosidade do terreno situado a barlavento de uma mudança de rugosidade
z_{o2}	m	comprimento de rugosidade do terreno situado a sotavento de uma mudança de rugosidade
z_{oef}	m	comprimento de rugosidade efetivo
z_{ref}	m	altura de referência
$z_s(x,y)$	m	forma do morro
z'	m	coordenada vertical e igual a " $z' = z - z_s(x, y)$ ".
Z_{min}	m	altura mínima, depende da categoria do terreno (CEN TC 250:2002)
$Z_{máx}$	m	altura máxima recomendada - 200 m (CEN TC 250:2002)

z_G	m	parâmetro de exposição (AIJ: 2004)
w	N/m^2	pressão externa agindo estaticamente e na direção normal à superfície como uma sobrepressão diretamente aplicada na superfície ou uma sucção para fora a partir da superfície; pressão do vento induzido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	32
1.1 OBJETIVOS.....	36
1.1.1 Objetivos Principais.....	36
1.1.2 Objetivos Secundários	36
1.2 METODOLOGIA	37
1.3 JUSTIFICATIVA	38
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
2.1 EVOLUÇÃO DA PESQUISA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA SOBRE SUPERFÍCIES COMPLEXAS	42
3 CAMADA LIMITE	59
3.1 INTRODUÇÃO.....	59
3.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA.....	61
3.2.1 Escoamento sobre Terrenos Planos.....	65
3.2.1.1 Escoamento sobre terrenos planos homogêneos	65
3.2.1.2 Escoamento sobre terrenos planos não-homogêneos	66
3.2.2 Escoamento sobre Taludes e Morros Isolados	68
3.2.2.1 Morros Isolados	70
3.2.2.2 Taludes	89
3.2.3 Escoamento em terrenos complexos.....	94
3.2.3.1 Escoamento em vales.....	97
3.2.3.2 Escoamento sobre múltiplos morros sinusoidais simétricos	98
3.2.3.3 Escoamento em múltiplos morros e vales	98
4 MODELOS ANALÍTICOS	102
4.1 INTRODUÇÃO.....	102
4.2 NORMAS TÉCNICAS E MODELOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS TOPOGRÁFICOS	105
4.2.1 Introdução	105
4.2.2 Modelo de Jackson e Hunt (1975)	106
4.2.3 Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988).....	107
4.2.3.1 Introdução	107
4.2.3.2 Fator de exposição modificado.....	107
4.2.4 Norma Brasileira NBR 6123 (1988)	111
4.2.4.1 Fator Topográfico S_1	112
4.2.4.2 Fator de Rugosidade(ou parâmetro meteorológico) S_2 :	114
4.2.4.3 Fator Estatístico S_3	116
4.2.5 European Standard: EUROCODE 1: Basis of Design and Actions on Structures- CEN TC 250:2002.....	117
4.2.5.1 Velocidade média do vento	117
4.2.5.2 Metodologia.....	118
4.2.5.2.1 Fator topográfico	121
4.2.5.2.1.1 Fator de locação topográfica.....	122
4.2.5.2.1.1.1 Áreas a barlavento de todas as características de terreno.....	122
4.2.5.2.1.1.2 Áreas a sotavento de penhascos e taludes.....	122
4.2.5.2.1.1.3 Áreas a sotavento de morros e cumes	123

4.2.6 Australian/New Zealand Standard: Minimum Design Loads on Structures - AS/ NZS 1170.2:2002	124
4.2.6.1 Velocidade básica do vento	124
4.2.6.2 Metodologia.....	124
4.2.7 Architectural Institute of Japan - AIJ: 2004	128
4.2.7.1 Velocidade do vento projetada	128
4.2.7.2 Velocidade básica do vento	129
4.2.7.3 Metodologia.....	129
4.2.7.3.1 Fator de direcionalidade do vento.....	129
4.2.7.3.2 Fator perfil de velocidade do vento	130
4.2.7.3.3 Velocidade média do vento	133
4.2.7.3.4 Intensidade da turbulência e escala da turbulência.....	136
4.2.7.3.5 Fator topográfico para intensidade da turbulência	136
4.2.8 American Society of Civil Engineering Standard, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures- ASCE/SEI 7-05: 2005	138
4.2.8.1 Velocidade básica do vento	139
4.2.8.2 Metodologia.....	139
4.2.8.2.1 Fator de direcionalidade do vento-K_d.....	139
4.2.8.2.2 Fator de importância	139
4.2.8.2.3 Categorias de exposição	140
4.2.8.2.4 Direção do vento e setores	141
4.2.8.2.5 Categorias de rugosidade da superfície	141
4.2.8.2.6 Categorias de exposição	141
4.2.8.2.7 Coeficiente exposição pressão velocidade”.....	142
4.2.8.2.8 Pressão da velocidade	143
4.2.9 National Building Code of Canada- NBCC	148
4.2.9.1 Velocidade média do vento	149
4.2.9.2 Metodologia.....	149
4.2.9.2.1 Cargas devidas ao vVento.....	149
4.2.9.2.1.1 Carregamento especificado de vento	149
4.2.9.2.1.2 Fator de exposição C_e	151
4.2.9.2.1.2.1 Procedimeto simplificado:.....	151
4.2.9.2.1.2.2 Procedimento detalhado	152
4.2.9.2.1.3 Fator efeito de rajada C_g	153
4.2.9.2.1.4 Efeitos dinâmicos do vento.....	153
4.2.9.2.1.5 Cargas totais e parciais.....	153
4.2.9.2.1.6 Velocidade incremental do vento sobre morros e taludes.....	154
4.3 COMPARAÇÕES ENTRE AS NORMAS.....	156
4.3.1 Introdução	156
4.3.2 Estudo comparativo entre as normas citadas.....	157
5 TÉCNICA EXPERIMENTAL: ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	162
5.1 INTRODUÇÃO.....	162
5.2 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	164
5.2.1 Histórico.....	164
5.2.2 Técnicas de simulação	167
5.2.3.1 Instrumentação	173
5.2.3.2 Vento simulado.....	176
5.2.3.3 Aquisição de dados.....	178
5.2.3.4 Modelos adotados	180

5.2.3.4.1 Experimento I – Modelos Hipotéticos.....	180
5.2.3.4.2 Experimento II –Área complexa real composta por morro isolado e assimétrico, três pequenos morros baixos e simétricos e avaliação de três pontos geográficos em solo internos à área	185
6 RESULTADOS	188
6.1 TERRENO PLANO	188
6.2 MORROS ISOLADOS SIMÉTRICOS	189
6.3 ÁREA COMPLEXA COMPOSTA POR MORRO ISOLADO E ASSIMÉTRICO E TRÊS PONTOS INTERNOS A MESMA	200
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSIÇÃO DO MODELO ANALÍTICO	216
8. CONCLUSÕES.....	226
8.1 SUGESTÃO PARA NOVOS ESTUDOS	230
9 REFERÊNCIAS	231
ANEXO A – PARÂMETROS, P, Z₀, C_{AS}.....	244
ANEXO B - ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PERFIS DE VENTOS p= 0,11 E p=0,23 E AS MEDIÇÕES EM TÚNEL DE VENTO DOS CUMES DO EXPERIMENTO I E DOS PONTOS IDENTIFICADOS NO EXPERIMENTO II - ÁREA COMPLEXA REAL CONTENDO MORRO ISOLADO ASSIMÉTRICO E TRÊS PONTOS EM SOLO	249
ANEXO C - PERFIS DE VELOCIDADE DO VENTO COLETADOS EXPERIMENTALMENTE COMPARADOS COM AS NORMAS ANALÍTICAS: NBR 6123(1988), EUROCODE-CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, ASCE 7-95:2005; AS/NZS:2002 E NBCC:2005 PARA OS EXPERIMENTOS I E II, CATEGORIAS I, P=0,11 E III-IV, p=0,23, 2D E 3D., NORMALIZADOS A 275 M E 440 M.....	256
ANEXO D - PERFIS DA VELOCIDADE DE VENTO COLETADAS EM TÚNEL DE VENTO COMPARADAS COM AS NORMAS ANALÍTICAS NBR 6123(1988), EUROCODE-CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, ASCE 7-95:2005 E NBCC:2005 PARA OS EXPERIMENTOS I E II, SEM NORMALIZAÇÃO	273
ANEXO E – COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS PARA O CUME DOS MODELOS DO EXPERIMENTO I: MODELOS HIPOTÉTICOS A, B, C E D - MORROS ISOLADOS SIMÉTRICOS BI E TRIDIMENSIONAIS.....	281
ANEXO F - PERFIS DA VELOCIDADE DE VENTO TESTADOS PARA AS NORMAS ANALÍTICAS NBR 6123(1988), ASCE 7-95:2005	282

1 INTRODUÇÃO

A estrutura do vento natural varia de acordo com o clima e com as condições de rugosidade da superfície terrestre¹. O vento, sob um enfoque macro-meteorológico, pode ser traduzido pelo movimento das massas de ar na atmosfera, as quais são oriundas das variações de temperatura no globo terrestre. Além dos fenômenos geofísicos, tais como a estratificação térmica, os gradientes de pressão também influenciam os movimentos das massas de ar, aumentando a complexidade da questão.

A superfície atmosférica encontra-se no limite inferior do domínio atmosférico. O vento junto à superfície é desacelerado pela rugosidade superficial, que determina o surgimento da chamada camada limite atmosférica (C.L.A.) ou camada planetária, a qual se desenvolve entre 100 a 3.000 m acima do solo. De modo geral, a velocidade média do vento na C.L.A. aumenta com a altura, sendo que o escoamento nesta camada tende a ser turbulento, uma vez que este responde às características da rugosidade da superfície. O restante da troposfera é denominado de atmosfera livre – (A.L.) (MOREIRA et al., 2007). É na C.L.A. que são encontrados um dos maiores gradientes de velocidade, temperatura e umidade do ar que ocorrem na atmosfera. Nessa região, concentra-se a maior parte da atividade humana, estando diretamente influenciada por estruturas globais e locais. O conhecimento detalhado das características do escoamento sobre e no entorno de elevações situadas dentro da C.L.A. é de grande interesse em muitas aplicações, especialmente àquelas ligadas à Engenharia do Vento, tais como identificação de cargas em edificações, pontes e linhas de transmissão, estudos de dispersão de poluentes, estudos agro-meteorológicos, segurança da aviação e em aplicações em prospecção de energia eólica.

A presente pesquisa focaliza a investigação dos fenômenos relacionados ao escoamento da camada limite turbulenta em estabilidade neutra em uma orografia complexa. O escoamento sobre e no entorno de terrenos complexos enseja grande importância para o estudo da C.L.A., dado que morros ou taludes provocam uma alteração no escoamento. Esta alteração é

¹ Rugosidade da superfície terrestre: chamada também de rugosidade superficial é caracterizada pelos efeitos acumulados estatisticamente de um grande número de obstáculos, tanto naturais como artificiais. Este parâmetro é definido pela forma, dimensões e densidade dos elementos que a constituem (tipos de terrenos, vegetação, edificações, lagos e mares) (Blessmann, 1995).

identificada, principalmente pela sobreaceleração a barlavento do morro, aproximação das linhas de corrente no cume deste e o surgimento de uma área de instabilidade e recirculação do vento, a sotavento. Ao findar esta zona, a qual denomina-se esteira turbulenta do vento, as linhas de corrente a se recompor, estando seu comportamento identificado como o de um terreno plano. Em estudos de dispersão de poluentes, o foco de investigação das esteiras está associado à capacidade de ocorrência de um forte efeito detrimental nas mesmas, o que pode ocasionar o aprisionamento de poluentes. Arya (1988) atesta que, escoamentos sob terreno angulosos constituem-se propensos à formação de vórtices, os quais só podem ser identificados nos morros em um escoamento tridimensional.

Uma das tendências científicas que mais se verifica para o cálculo detalhado dos parâmetros conexos ao escoamento sob uma área, está assentada no emprego de Modelos Analíticos, os quais são desenvolvidos, basicamente, por meio de parâmetros que traduzem os efeitos da topografia sobre o escoamento (STRATARIDAKIS; WHITE; GREIS, 1998).

Ainda na década de 60, pesquisadores provaram ser possível a obtenção de uma escala apropriada da estrutura do vento em um ambiente experimental, denominado túnel de vento, onde, para efeitos da obtenção dos efeitos da rugosidade do terreno, parte do piso do túnel seria coberta com elementos físicos capazes de simular estrutura do vento por ocasião da incidência do ambiente simulado consoante ao terreno em análise (JENSEN; FRANK, 1963, 1965). Estudos experimentais a partir de modelos aeroelásticos testados em túnel de vento suprem situações nas quais métodos analíticos não podem ser usados para estimar as cargas de vento e associar a resposta estrutural, principalmente quando as formas aerodinâmicas da edificação são incomuns e/ou o edifício muito flexível.

O comportamento da velocidade do vento e da turbulência são bem conhecidos em camadas limites estabilizadas neutramente, sobre terrenos homogêneos. Entretanto, em que pese os consideráveis avanços feitos na simulação em túnel de vento, existem aspectos na modelagem do escoamento que ainda exigem maior investigação (FARELL et al., 1999), incluindo a simulação da variabilidade direcional do vento e a determinação do efeito de flutuações de velocidade transversal de larga escala. As características topográficas atuam como obstrutores, acelerando o vento junto ao solo e induzindo a um aumento de pressão sobre estruturas localizadas em tais regiões, determinando padrões de escoamento que variam localmente (NGO e LETCHFORD, 2008).

O preciso conhecimento das alterações da C.L.A. causadas pelas trocas abruptas na topografia local é essencial para o aproveitamento de potenciais condições de vento, em áreas complexas. Em se tratando de terrenos dessa natureza, agregam-se outras ocorrências naturais, tais como a turbulência² e o descolamento do escoamento sujeito a uma variedade de condições atmosféricas. Essas situações contribuem para que as referidas áreas constituam-se em cenários de alta complexidade, imprevisibilidade e de difícil determinação e quantificação de seus fenômenos.

Segundo Miller (1995), a partir de uma simulação experimental de um escoamento neutramente estratificado da C.L.A., em túnel de vento é possível parametrizar os efeitos do vento sobre um terreno complexo, não homogêneo. A definição de variáveis tais como: o perfil das velocidades médias, a intensidade da turbulência, a escala integral e o espectro de potência, constituem-se em elementos basilares para a construção da modelagem do vento.

A tendência ao aumento da geração de energia eólica na composição das matrizes de energia, tem considerado a instalação de fazendas eólicas em áreas de grande complexidade. Essas áreas acarretam incertezas no emprego de modelos até então dominantes para terrenos planos, tais como modelos matemáticos simples e lineares de 1D.

A velocidade do vento é diretamente proporcional à altura. Desta forma, o aproveitamento de áreas complexas para instalação de usinas de geração eólioeletrica pode ser propício em função dos efeitos crescentes na velocidade do vento proporcionados um um gradiente incremental que tais características topográficas proporcionam. Assim exposto, cumes e penhascos podem constituir-se em potenciais locais para aproveitamento energético. Por outro lado, em função da complexidade do campo de vento não ser precisada com exatidão, esta situação determina variâncias na expectativa do desempenho das turbinas eólicas. Em áreas complexas, a componente vertical do vento que incide no morro pode ser significativa, afetando o desempenho do equipamento. Dado que o desempenho de uma turbina eólica é governado pelas condições locais onde se encontra instalada, variando com a meteorologia e com a estação do ano, medições de vento de, pelo menos um ano, *in loco* constituem-se o início da investigação, buscando suprir a inconstância natural da variável em questão, segundo as técnicas de medição do Measuring Network of Wind Energy Institutes – MEASNET. De modo a qualificar as informações acerca das especificidades de um

² Turbulência: é a agitação mecânica do escoamento médio causada pela rugosidade natural ou artificial ou nos processos de convecção causados por gradientes térmicos (BLESSMANN, 1995).

escoamento, especialmente em áreas complexas, é desejável que o período de coleta de dados seja maior que o mínimo de um ano (STRATARIDAKIS; WHITE; GREIS, 1998).

Objetivando celeridade e precisão na estimativa do potencial eólico de uma área complexa, a tendência que atualmente mais se verifica para a identificação dos fenômenos físicos conexos a essas áreas considera uma ferramenta híbrida, na qual a modelagem física em túnel de vento e o estudo numérico³ computacional são adicionados às medições de superfície, minimizando a quantidade e a duração destas, sem, entretanto, substituí-las, uma vez que as mesmas se constituem em elementos experimentais “in loco” indispensáveis para validação dos resultados da modelagem (STRATARIDAKIS; WHITE; GREIS, 1998). Em que pese os consideráveis avanços evidenciados na simulação da camada limite em túnel de vento, existem aspectos nas técnicas de medição e modelagem que ainda exigem investigação, especialmente em terrenos complexos. Nesses locais, os vórtices de Kármán, que originam forças periódicas oblíquas em relação à direção do vento médio, podem tornar pequenas as forças na direção do vento em relação às forças na direção transversal do vento (NÚÑEZ, 2001). Por outro lado, modelos numéricos correntes unidimensionais são incapazes de prever a separação do escoamento na área de turbulência. A definição da abrangência espacial destas áreas remanesce como a questão posta, uma vez que turbinas eólicas colocadas nestas regiões de recirculação, devido à natureza turbulenta do escoamento, provavelmente, sujeitas a esforços de carga advindos da componente vertical da força de cisalhamento, além de um comprometimento no rendimento (STRATARIDAKIS; WHITE; GREIS, 1998).

Para o desenvolvimento do presente trabalho adotou a simbologia e terminologia recomendada pela Norma Brasileira NBR 6123(1988). Sendo assim, é entendido como morro, um terreno no qual a inclinação é suficiente para provocar a separação do escoamento. O ápice dessas elevações (maior altura desde a base até o maior ponto da elevação) é identificado como cume. Vale é um acidente geográfico cujo tamanho pode variar de uns poucos quilômetros quadrados a centenas ou mesmo milhares de quilômetros quadrados de área. É tipicamente uma área cercada por áreas mais altas, como montanhas ou colinas.

³ Modelos Numéricos: A análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais, dentro da Mecânica dos fluidos computacional, empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas objetiva a implementação de um algoritmo numérico para análise de escoamentos turbulentos, tridimensionais, transientes, incompressíveis e isotérmicos, através da simulação de grande escala (Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos - GESTE da UFRGS, 2009).

1.1 OBJETIVOS

A presente pesquisa focaliza a investigação dos fenômenos relacionados ao escoamento da camada limite turbulenta, neutramente estabilizada, em uma orografia complexa, analisando detalhes da velocidade média do vento, estrutura do escoamento, identificação das regiões de separação e recolamento do escoamento, empregando dois modelos analíticos de Jackson e Hunt (1975) e Davenport, Surry e Lemelin (1988) e seis códigos de carga de vento comparados com medições experimentais em túnel de vento.

1.1.1 Objetivos Principais

- a) Investigar as características do vento (velocidade, direção, espessura da camada limite, características da turbulência) provocadas por terrenos de orografia complexa, por meio de um estudo experimental e teórico, em modelos topográficos reduzidos;
- b) Fazer uma análise comparativa entre os resultados obtidos com a aplicação das normas e a validação da análise experimental para os modelos elencados;
- c) Sugerir aspectos a serem considerados em uma eventual revisão da NBR 6123(1988), no que diz respeito ao fator topográfico.

1.1.2 Objetivos Secundários

- a) Determinar as vantagens e limitações dos modelos reduzidos;
- b) Propor modelos que sirvam como subsídio para a revisão da NBR 6123(1988);
- b) Revisar os códigos nominados para o estudo dos efeitos da velocidade sobre terrenos complexos: Norma Brasileira - Forças devidas ao vento em edificações - NBR 6123 (1988); European Standard: Eurocode1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN TC 250: 2002; Australian/New Zealand Standard AS/NZS 1170.2: 2002; Architectural Institute of Japan AIJ: 2004; American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95 (ASCE 7-95), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (2005); National Building Code of Canada, (NRCC 2005);

1.2 METODOLOGIA

A presente pesquisa é desenvolvida a partir de um planejamento geral do trabalho, segundo a metodologia abaixo discriminada:

- a) revisão bibliográfica dos últimos referenciais mundiais relativos a modelos semiempíricos e trabalhos experimentais sobre o tema;
- b) estudos experimentais no túnel de vento Prof^o. Joaquim Blessmann, no Laboratório de Aerodinâmica de Construções - LAC, da Engenharia Civil da UFRGS. A primeira série de estudos contempla o ensaio de oito modelos empíricos de morros isolados, simétrico, com diferentes inclinações e mesma altura. A segunda série de ensaios foi realizada com modelos reduzidos de uma área complexa real, contendo um morro isolado assimétrico e mais três pontos em solo;
- c) validação e comparação de modelos ou normas analíticas de vento frente aos resultados experimentais e entre estes com as normas elencadas. São elas: Norma Brasileira - Forças devidas ao vento em edificações - NBR 6123 (1988), European Standard: Eurocode1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN TC 250:2002, Australian/New Zealand Standard (Norma Australiana/Neozelandesa) AS/NZS 1170.2: 2002, Architectural Institute of Japan AIJ: 2004, American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95 (ASCE 7-95), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (2005), National Building Code of Canada, (NRCC 2005).

O método de simulação experimental realizado no túnel de vento Prof^o. Joaquim Blessmann consistiu na instalação, em seu interior, de modelos em escala reduzida representativos dos arranjos topográficos investigados. Em cada modelo foram determinadas diretrizes de análise. No Experimento I, no cume de oito modelos, quatro bidimensionais e quatro tridimensionais foi localizado ponto de medição de velocidades do vento e de turbulências em 20 alturas. O espaçamento da medição iniciou com 5 mm até altura de 30 mm, 10 mm até 50 mm, 20 mm até 70 mm, 30 mm até 160 mm, 40 mm até 200 mm, 50 mm até 600 mm. No Experimento II - área complexa, foram definidas nove estações de medição sobre a radial do morro assimétrico principal da área, com medições de velocidade e turbulência nas mesmas alturas do Experimento I.

A medição em seções e em diferentes alturas de cada seção propicia a construção do diagrama de estratificação da velocidade do vento médio e da definição do perfil de intensidade da turbulência nas diferentes alturas acima do solo, para diferentes direções e sentidos do vento, dado que as mesmas variam com as elevações e são influenciadas pelas características do terreno de entorno e por mecanismos de força geofísicos. Os modelos foram instrumentados

para medições de forças e/ou pressões estáticas do vento empregando-se sensores conectados a um sistema de anemometria de fio-quente, tubos Pitot e Sistema Streamline 90 N S integrado a um computador para a captação dos registros dos valores medidos.

A comparação entre resultados experimentais obtidos dos ensaios em túnel do vento com as normas analíticas identificadas ofereceu conclusões acerca da aplicação metodológica empregada nos mesmos para traduzir o comportamento do vento e a ocorrência efetiva dos fenômenos medidos. Importante enfatizar que em uma comparação entre dados advindos de diferentes ambientes de pesquisa, há que se considerar, por exemplo, as incertezas nas variações sazonais e na rugosidade da superfície, as quais reproduzem iguais incertezas e variações na velocidade do vento, particularmente na C.L.A. A rugosidade da superfície se altera com a estação do ano, ou com o passar dos anos, dado que a vegetação cresce ou muda e o entorno local se modifica, sofre acréscimos e/ou decréscimos de obstáculos, o que torna difícil a tarefa da identificação do valor mais correto a ser adotado para o comprimento de rugosidade " z_0 ".

Os resultados do presente estudo focam na comparação entre as normas analíticas citadas, entre estas e os estudos experimentais e entre as primeiras e a NBR 6123(1988).

1.3 JUSTIFICATIVA

A escassez de conhecimentos acerca das variações do escoamento sobre terrenos complexos, contrasta com o fato de que quase 70% da superfície de terra do globo é formada por morros mais ou menos elevados, isto é, exhibe características de terreno complexo. Pode-se dizer ainda que, na atualidade, modelos de clima global, modelos de previsões numéricas do tempo e modelos numéricos computacionais empregam relações que são baseadas na semelhança desenvolvida para terrenos planos e horizontalmente homogêneos (ROTACH et al., 2008).

O estudo dos mecanismos que interagem no escoamento, desencadeados pelas alterações abruptas da topografia, concentram-se nas estimativas das cargas do vento adotadas para o dimensionamento de estruturas situadas proximamente às regiões com alterações topográficas, estando inseridas nesse foco, as áreas de comunicação (cabos aéreos), de eletricidade (torres e linhas de transmissão) e edificações. Além disso, o crescente interesse

pela área de Engenharia do Vento deve-se também à crescente demanda por energia e pela viabilização da inserção da fonte eólica na Matriz Energética Brasileira.

Em terrenos complexos, tais como cumes de morros e taludes, fenômenos geofísicos diferenciados desencadeiam-se a partir da singular topografia. Citam-se como exemplos, o surgimento da componente vertical da velocidade do vento, a velocidade incremental do vento no sentido ascendente, nas regiões a barlavento e a turbulência, a sotavento. Nessas áreas, também se identifica a ocorrência do efeito Venturi⁴, o qual se soma ao diagnóstico corrente de mudanças na direção do vento (CORBETT, 2007). Dessa forma, características tais como espectro e a escala da turbulência são também determinantes para o diagnóstico dos fenômenos intercorrentes em uma área complexa.

Os modelos matemáticos lineares assumem que a potência de saída do aerogerador é função da velocidade do vento, necessitando a mesma ser corrigida, apenas no que se refere à massa específica do ar. Entretanto, segundo Meroney (1990), essas condições não se verificam em cenários de orografias extremas, com declividades a partir de 30%. Em que pese o entendimento do comportamento do escoamento sobre e no entorno dessas áreas tenha avançado, fenômenos associados à questão, especialmente aqueles que se desencadeiam em áreas próximas aos cumes de morros e taludes e o escoamento no pé dos morros, ainda representam campos não totalmente dominados. No que se refere a estudos de avaliação de potencial eólico, concepções errôneas acerca do diagnóstico do vento na região têm, como consequência, a definição de equipamentos inapropriados e/ou potencialmente subotimizados. Nessas situações, o desempenho de um projeto pode ser comprometido pelos prejuízos advindos do surgimento dos fenômenos acima nominados, não previstos, que determinam uma estimativa de geração de energia aquém da esperada. Áreas como cumes de morros, beiras ou bordas de taludes íngremes ou declives acentuados podem destruir as condições normais de um escoamento, posto que suas arestas ocasionam a separação deste, com o surgimento de áreas de turbulência. A condição de projeto eólico aceita como níveis administráveis os limites de 16% a 18% de variação da intensidade longitudinal da

⁴ Efeito Venturi: O efeito Venturi (também conhecido tubo de Venturi) consiste em que um fluido em movimento dentro de um conduto fechado diminui sua pressão ao aumentar a velocidade após passar por uma zona de secção menor. Se neste ponto do conduto introduz-se o extremo de outro conduto, produz-se uma aspiração do fluido conteúdo neste segundo conduto. Este efeito, demonstrado em 1797, recebe seu nome do físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822). O efeito Venturi explica-se pelo princípio de Bernoulli e o princípio de continuidade de massa. Se o volume de um fluido é constante, mas a secção diminui, necessariamente, a velocidade aumenta. Pelo teorema de conservação da energia se a energia cinética aumenta, a energia determinada pelo valor da pressão diminui forçosamente (JITSCHIN, 2004).

turbulência para bom desempenho de aerogeradores (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1999). Nessas áreas, a micro localização de turbinas eólicas permanece sendo uma tarefa desafiadora, uma vez que o exato ponto de ocorrência de cada fenômeno pode variar, de acordo com a geometria do terreno. Nessas situações, dois principais equívocos são constatados: concepções errôneas acerca das condições e características do vento local, bem como o emprego de métodos e ferramentas lineares, inadequados às condições complexas de um escoamento. De acordo com Derickson et al. (2004), os principais cenários que levam a um desempenho insatisfatório de equipamentos são:

a) Instalação de turbinas eólicas próximas à extremidades/bordas de precipícios, declives íngremes de taludes ou parte superior de planaltos. Nestes locais ocorre a separação do escoamento, a turbulência é alta e a componente vertical da velocidade do vento é grande, uma vez que os equipamentos encontram perfis extremos da velocidade do vento. A instabilidade atmosférica térmica também pode ser um fator de comprometimento do aproveitamento da área. Os planaltos integrados aos taludes podem também depender das características do terreno e da estabilidade térmica da atmosfera;

b) Instalação de turbinas em cumes de morros. Estas situações requerem a inclusão da análise das características do terreno, as quais geralmente produzem regiões de separação do escoamento. Os efeitos da velocidade incremental do vento modificam o escoamento e determinam diferentes carregamentos nas pás dos aerogeradores situados nesses locais, comprometendo o desempenho dos mesmos. A literatura é unânime acerca do difícil e complexo entendimento dos efeitos desencadeados por um escoamento em um terreno complexo, empregando-se para avaliação do potencial eólico da área apenas medições de superfície.

A complexidade do campo de vento sobre terrenos complexos varia consideravelmente, diária e sazonalmente, de acordo com a estabilidade térmica das massas de ar. Desse modo, cumes de morros, cordilheiras, vales e suas clareiras podem ser bons locais para aproveitamentos eólicos, desde que investigados também os efeitos decorrentes da estratificação térmica e demais fenômenos locais supracitados (MERONEY, 1990).

Strataridakis, White e Greis (1998) realizaram medições da velocidade média e da turbulência para o posicionamento de turbinas eólicas usando um modelo em escala em túnel de vento. A superfície do modelo desenvolvido foi estudada em diversas alturas, com o emprego de um anemômetro de fio quente. Foram construídos os perfis de velocidade e de turbulência nas regiões atípicas do modelo. Os dados coletados foram comparados às medições anemométricas. Uma das mais importantes conclusões foi a de que medições da turbulência

em túnel de vento poderiam indicar rápida e seguramente as posições mais favoráveis para a locação de turbinas eólicas em uma área, considerando-se que a medida da turbulência não requer longos períodos de medição, constituindo-se os túneis como uma importante ferramenta para micro localização de turbinas em uma área. Além desse fato, o experimento em túnel de vento é importante porque consolida as medições de superfície validando os dados obtidos das torres anemométricas. A simulação do escoamento atmosférico em túnel de vento é particularmente importante para a investigação dos efeitos gerados pela turbulência, onde há trocas de massa, calor e movimento na C.L.A., levando-se em consideração as diferentes topografias e formatos de edificações.

Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004) concordam com a assertiva acima afirmando que a identificação das variáveis físicas do escoamento, velocidade e turbulência em pontos característicos de um modelo simulado em túnel de vento, com o emprego de um anemômetro de fio-quente⁵ possibilita a identificação das zonas mais propícias para aproveitamentos eólicos.

Experimentos em túnel de vento com o emprego de medições em seções transversais em uma modelagem física do local têm oferecido resultados substanciais na identificação de fenômenos tais como: turbulência, separação e recolamento do escoamento em íngremes ou ásperos volumes de orografia complexa. Contudo, não eliminam incertezas quanto ao comportamento e magnitude da componente vertical do vento, a qual se define próximo às bordas, aos taludes e aos terrenos complexos em geral.

⁵ Anemômetro de fio quente: ou anemômetro de temperatura constante são equipamentos capazes de medir escoamentos de gases e líquidos com flutuações muito rápidas (alta turbulência). Permitem a medição em 1,2 ou 3 dimensões e o estudo das micro estruturas do escoamento (DANTECDYNAMICS, 2009). Ainda que sejam capazes de medir a velocidade instantânea, são insensíveis ao sentido do escoamento, não identificando escoamentos reversos, tais como separação-recolamento do escoamento (RASOULI; HANGAN; KAMRAN, 2007).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVOLUÇÃO DA PESQUISA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA SOBRE SUPERFÍCIES COMPLEXAS

Os fundamentos do estudo da C.L.A. sobre terrenos complexos datam dos anos 70, com os primeiros experimentos de campo focados no fenômeno sobre superfícies planas e horizontalmente homogêneas. A pesquisa evoluiu para o estudo do comportamento do vento em regiões com morros baixos e isolados, investigando-se também as características da turbulência sob o aspecto bi-dimensional, em túneis de vento. Em 1965, Plate e Lin mediram o perfil da velocidade média e a variação das oscilações da velocidade longitudinal considerando diversos tipos de elevações bidimensionalmente.

Counihan, Jackson e Hunt (1974) acrescentaram às variáveis acima, o estudo da variação das oscilações da componente vertical do vento e das tensões de Reynolds para o desenvolvimento de camadas limites em túnel de vento.

Em 1975, Jackson e Hunt tornam-se os primeiros pesquisadores a desenvolver um modelo analítico para um escoamento bidimensional, sobre um morro baixo e isolado. Esses pioneiros estudaram um morro baixo e isolado, onde a rugosidade da superfície, “ z_0 ”, era uniforme e insignificante em relação à escala de comprimento horizontal do mesmo e onde não existia separação do escoamento. O modelo apresentado forneceu prognósticos para as mudanças da velocidade média do vento e para a constituição e entendimento da estrutura da turbulência nessas regiões, entretanto ficou limitado a morros com pequena inclinação, isto é, $d \ll L$. Leia-se “ d ” a altura da elevação e “ L ” o comprimento característico do morro na direção do escoamento. Os autores citados mostraram que para morros com pequena declividade ($d/L \ll 1$) seria possível empregar as equações que regem o movimento dos fluidos. Um dos principais resultados obtidos na época foi que a alteração do escoamento na presença de morros baixos e isolados, a velocidade do vento e os esforços de corte eram proporcionais ao tamanho, forma e rugosidade desses.

Na pesquisa com modelos numéricos de simulação de escoamentos, desde micro até meso-escala, podem ser citados também como pioneiros na década de 70, Tapp e White (1976) e Bowen e Lindley (1976). Esses autores averiguaram o escoamento bidimensional sobre um

talude, analisando os efeitos da topografia local em um perfil de estratificação do vento próximo ao solo. Para tanto, foram testadas quatro declividades, variando desde uma proporção de penhasco até uma escala de 4:1. Estudos de campo, em morros baixos e isolados, tais como o Morro Brent Knoll, foram desenvolvidos por Mason e Sykes (1979). Estes autores estenderam o modelo de Jackson e Hunt (1975), para a análise tridimensional de um morro assimétrico. Os resultados sugeriram que as trocas mais significantes nas características da turbulência ocorrem apenas na região da esteira a sotavento, onde fica evidente a transferência de energia para frequências mais altas.

Em paralelo a essas experiências, Taylor et al. (1987, 1989) e Finnigan (1988) desenvolveram medições em um escoamento turbulento numa atmosfera neutramente estratificada, também sobre baixos e isolados morros. Compararam os dados coletados em campo com aqueles obtidos em modelagens físicas experimentais, em túnel de vento.

Em dez anos, na década de 80, entre as campanhas de campo mais significativas na avaliação do comportamento do escoamento, encontraram-se aquelas desenvolvidas sobre Black Mountain (BRADLEY et al., 1980), Kettles Hill (TAYLOR; MASON; BRADLEY, 1987), Blashaval (MASON; KING, 1985), Askervein (TAYLOR; TEUNISSEN, 1983) e Kettles Hill (SALMON et al., 1988), todas empregando medições tridimensionais sobre morros baixos e isolados, com moderadas inclinações. Esses experimentos sustentaram as teses de Jackson e Hunt (1975), não apenas confirmando o modelo, mas acrescentando evoluções ao mesmo.

Britter, Hunt e Richards (1981), analisaram os efeitos do escoamento em um morro sinusoidal com rugosidade superficial, $z_0 = 0.02 d$, (sendo "d" a altura do morro), com inclinação de 26°. Comparando os resultados experimentais com a teoria de Jackson e Hunt (1975), os citados autores constataram haver uma boa concordância entre os resultados analíticos com os experimentais, na região a barlavento do morro. Entretanto, na região a sotavento, não houve concordância entre as metodologias citadas. Britter, Hunt e Richards (1981) demonstraram que a velocidade incremental do vento no cume do morro é devido, tanto à inclinação quanto à rugosidade da superfície.

Mitsuta, Tsukamoto e Neno (1983), estudaram as distribuições espaciais das características do vento sobre uma faixa de morros. Para tanto, dados de campo foram coletados a partir de torres de linha de transmissão de, aproximadamente, 700 m de extensão localizadas sobre um cume de um morro. A distribuição da velocidade média do vento foi coletada a cada 50 m ao

longo dessa linha e foi proporcionalmente correlacionada com a topografia local. Os valores da velocidade do vento em cada ponto foram menos influenciados que a velocidade média do vento. A inclinação do vento foi maior em uma altura mais baixa, a barlavento do cume. Os espectros da potência foram comparados em cada ponto e mostraram-se altamente distorcidos proporcionalmente à topografia. A principal conclusão obtida foi que a intensidade da turbulência é o inverso da distribuição da velocidade média, característica do vento em terrenos planos.

Teunissen (1983) desenvolveu, em túnel de vento, a simulação tridimensional do escoamento sobre um morro baixo, localizado ao pé das montanhas rochosas, no oeste do Canadá. Este experimento foi parte da comparação feita com três ferramentas: modelagem numérica computacional, modelagem física em túnel de vento e medições experimentais. Estas últimas foram realizadas com 10 torres de 10 metros de altura localizadas no Morro Kettles. Os valores da velocidade incremental do vento ΔV - obtidos nos ensaios em túnel de vento, em localizações a barlavento, no cume e a sotavento do morro foram comparados com os correspondentes valores coletados em torres anemométricas. A resposta obtida dos experimentos foi que, em geral, houve uma boa aproximação entre o modelo em túnel de vento e os valores obtidos em campo. Por outro lado, evidenciou-se, na primeira experiência, uma tendência a superestimação dos valores obtidos em campo. Esse autor afirma que a metodologia de Jackson e Hunt (1975), para estimativa do fator máximo da velocidade incremental do vento, também determina, analiticamente, valores maiores que os observados na realidade.

Jensen (1983) pesquisou o perfil da velocidade do vento sobre taludes empregando a teoria analítica de Jackson e Hunt (1975). Sua conclusão mais importante foi a de que esta teoria é falha na exata previsão das variações verticais da alteração do vento em taludes.

Seguiram-se a esses, as pesquisas de Mason e King (1984), (1985), desenvolvidas sobre o Sirhowy Valley⁶ (1984) e sobre o Morro Blashaval⁷ (1985), um composto de colinas e vales, nos quais quatro modelos de escoamento de superfície de camada limite foram comparados aos modelos citados. Seguiram-se a esses, os estudos no Morro de Nyland Hill⁸, por Mason

⁶ O Vale de Sirhowy localiza-se no sul do País de Gales.

⁷ O Morro Blashaval situa-se North Uist, na Escócia.

⁸ Nyland Hill é uma colina isolada de 760 m no sul do distrito de Mendips na Inglaterra.

(1986), no Morro de Askervein⁹, por Taylor e Teunissen (1983) e no Morro Kettles, desenvolvido por Salmon et al. (1988), os quais significaram importantes avanços na modelagem teórica do escoamento sobre morros baixos e isolados. O melhor aspecto documentado do escoamento da camada limite turbulenta sobre este tipo de característica topográfica foi o comportamento do campo horizontal de velocidade média. As principais características desse campo foram identificadas como: uma pequena redução na velocidade nos níveis mais baixos, a barlavento do morro, a identificação do surgimento da velocidade incremental do vento próxima ao cume do morro e a formação de uma esteira turbulenta, a sotavento do mesmo. Pode-se afirmar que a velocidade incremental do vento no cume de morros é maior quando medida bidimensionalmente, do que tridimensionalmente, para perfis similares (MILLER, 1995).

Arya, Capuano e Fagen (1987) analisaram a influência da razão de aspecto¹⁰ de um morro no aumento da velocidade do escoamento. A elevação parametrizada como (L/d) , sendo "L" comprimento característico da mesma e "d" a altura desta desde o pé até o cume, em um experimento em um túnel de vento. Os citados autores constataram que a velocidade incremental do vento é inversamente proporcional a razão de aspecto. Atestaram também, que as tensões de Reynolds aumentaram sobremaneira na região da esteira do escoamento.

Na década de 90, Ferreira et al. (1995) desenvolveram medições do campo de velocidade em escoamentos, com o emprego de Velocimetria por Imagem de Partículas - PIV¹¹, quantificando características importantes do campo da turbulência em morros isolados, em análises bidimensionais.

⁹ O morro de Askervein localizado na ilha do south Uist na Escócia é uma elevação elíptica com 126 m de altura do nível do mar, com vegetação baixa e não uniforme. O projeto desenvolvido em 1982/83, ainda representa uma referência para estudos de vento em terrenos complexos. A pesquisa desenvolvida na época, analisou o escoamento do vento e a turbulência sobre baixos morros em camadas neutramente estratificadas, empregando modelos numéricos e testes em túnel de vento. As tomadas de campo foram coletadas por anemômetros de copos na altura de 10 m ao longo de três linhas. Em uma estação de referência de medições de vento, foram feitas medidas simultâneas em seis diferentes alturas a partir do nível do mar de 30 m até 267 m.

¹⁰ Razão de aspecto (*aspect ratio*): é a relação entre os comprimentos horizontal e vertical bidimensionais. Em geral obtida pela divisão entre as medidas da largura e da altura. Ex: razão entre o comprimento e a largura de uma edificação (SURRY; STATHOPOULOS, 1988).

¹¹ PIV - Particle Image Velocimetry: técnica de medição de campo, a partir de imagens digitalizadas, que permite a obtenção simultânea de velocidades em diferentes pontos do meio fluido, situados em uma área delimitada pelo plano de luz laser. Vetores de velocidade em 3D, com diferentes ângulos, permitem o diagnóstico do escoamento, turbulência, perfil de velocidades bi-dimensional, horizontal e verticalmente. Empregado em: túnel de vento para testes aerodinâmicos, medições de velocidade em escoamento d'água, validação e verificação de modelos numéricos e experimentais, entendimento de escoamentos não lineares, tais como ondas e vórtices e estudos da camada limite atmosférica (DANTECDYNAMICS, 2009).

Kaimal e Finnigan (1994) demonstraram que sobre terrenos complexos o escoamento se processa sob dois efeitos: equilíbrio local e rápida distorção. O equilíbrio local acontece quando existe um balanço entre a produção de turbulência e a dissipação de energia. Nesse caso, a advecção¹² e o transporte turbulento são pequenos. A existência deste equilíbrio permite expressar os escoamentos superficiais em termos de gradientes escalares locais. Desta forma, a rápida distorção ocorre quando o escoamento médio muda rapidamente e o equilíbrio local não se sustenta.

Miller (1995) analisou o comportamento da camada limite turbulenta por meio de medições da velocidade do vento e dos esforços de Reynolds sobre um trem de ondas sinusoidais simétricas, sobre superfícies complexas, empregando uma combinação de métodos experimentais em túnel de vento e métodos numéricos. Alguns dos principais focos de sua pesquisa incluem uma investigação acerca da velocidade incremental do vento no cume dos morros, associada à distribuição de pressões superficiais e os correspondentes valores da força de arrasto¹³. Nesse estudo, o autor afirma, em seus principais resultados, que o perfil da velocidade média de uma determinada área, obedece ao perfil logarítmico apenas em alturas acima da superfície dos cumes dos morros. Após o primeiro cume, embora ainda exista um crescente aumento da velocidade horizontal, o valor da velocidade incremental do vento é relativamente reduzido, comparativamente ao do primeiro cume, sendo que o escoamento rapidamente se ajusta à superfície até o terceiro cume. Além desse ponto, as medições do escoamento acima dos demais cumes, mostraram um alto grau de repetição do modelo. As medições da variação da estrutura do escoamento em um número de alturas acima das ondas sinusoidais, em uma superfície plana, revelaram a presença de uma segunda estrutura tridimensional de escoamento. Observação similar foi efetivada por Gong e Ibbetson (1989).

As medições do escoamento sobre um comprimento de onda ou seus equivalentes em superfícies complexas sugerem que uma vez estabilizado o campo do escoamento, este pode ser dividido em duas regiões: uma interna, imediatamente adjacente à superfície, na qual a topografia local e os efeitos da esteira são importantes e uma externa, onde o escoamento é mais ou menos independente, em relação a superfície. Essa região externa é caracterizada por

¹² Advecção: transmissão do calor pelo deslocamento horizontal do ar.

¹³ Arrasto: é a força que faz resistência ao movimento de um objeto sólido através de um fluido (um líquido ou gás). O arrasto é feito de forças de fricção (atrito), que agem em direção paralela à superfície do objeto (primariamente pelos seus lados, já que as forças de fricção da frente e de trás se anulam), e de forças de pressão, que atuam em uma direção perpendicular à superfície do objeto (primariamente na frente e atrás, já que as forças de pressão se cancelam nas laterais do objeto). Ao contrário de outras forças resistivas, como o atrito, que é quase independente da velocidade, a força de arrasto depende da velocidade.

uma redução na velocidade horizontal média e um aumento nas tensões de Reynolds, quando comparadas aos valores correspondentes encontrados para uma superfície plana com a mesma rugosidade. No que se refere aonexo causal entre separação do escoamento, rugosidade e inclinação da área, as medições anemométricas mostraram que tanto em superfícies lisas quanto rugosas, esse fenômeno depende da inclinação da superfície e da rugosidade desta. Para superfícies lisas, os estudos de visualização do escoamento, sugerem que a separação do escoamento é limitada a pequenas regiões na esteira, enquanto que nos casos onde existia rugosidade, o escoamento mostrou-se separado desde o cume do morro até o pé. Relativamente à força de arrasto, a análise das escalas de amplitude de terrenos complexos contribui para a identificação e quantificação do fenômeno (MILLER, 1995). O autor enfatiza que a identificação do efetivo comprimento de rugosidade é o desafio ainda não totalmente debelado. Também ressalta que a identificação do fenômeno da turbulência na camada limite sobre terrenos complexos, o cálculo da força de arrasto agindo em tais superfícies, quando comparada àquela agindo em terrenos homogêneos e horizontalmente planos, também acrescenta desafios à ciência.

Founda et al. (1996) realizaram medidas de parâmetros turbulentos médios e espectros na direção e contra direção do vento, empregando torres localizadas em cumes de morros. As análises objetivaram estabelecer diferenças entre os parâmetros obtidos em terrenos de topografia irregular e os obtidos em terrenos planos. Os resultados atestaram que as variâncias das componentes de ventos horizontais são de menor grandeza num terreno complexo do que aquelas medidas sobre um terreno plano. Por outro lado, as variâncias da componente vertical do vento são maiores em terrenos complexos.

Kim et al. (1997) mediram perfis de velocidades de vento sobre morros empregando um modelo tridimensional, com a ajuda de anemômetros de fio quente e tubos Pitot. Estas experiências agregaram substanciais conhecimentos para a identificação das características da região de recirculação à sotavento do morro (RASOULI; HANGAN; KAMRAN, 2007).

Kim et al. (1997) buscaram a validação de modelos matemáticos para a previsão do comportamento do escoamento sobre morros. Realizaram experimentos em túnel e simulações numéricas em morros isolados e em série. As comparações obtidas pelos resultados experimentais confrontados com as simulações numéricas mostraram boa concordância, tanto para os valores de velocidade média, quanto para as distribuições de pressão. No experimento

de morros com declividade até 0,3, os valores da velocidade incremental do vento foram bem consolidados pela teoria linear.

Ishirara, Hibi e Oikawa (1999), mediram as três componentes da velocidade do vento, de modo a detalhar a turbulência e o escoamento médio tridimensional sobre um modelo de um morro com inclinação de 32° medida com sondas de fio quente. Por esse modelo experimental, os pesquisadores constataram que a velocidade incremental do vento não ocorre apenas no cume do morro, mas também no declive dos lados, ou seja no ponto da borda correspondente a meia altura do morro.

Kim e Patel (2000), no século XX, desenvolveram modelos de separação e recirculação do escoamento bi e tridimensional sobre modelos topográficos, em terrenos não homogêneos (SPREITZHOFER e RADERSCHALL, 2003).

Song, De Graaff e Eaton (2000), analisaram experimentalmente a separação, o recolamento e a recomposição do escoamento. Os autores constataram que as tensões de Reynolds $\overline{u w}$ aumentam rapidamente em regiões da camada limite com gradiente adverso. Esse aumento das tensões de Reynolds permanece, mesmo quando o escoamento atinge o ponto de recolamento, decaindo quando a turbulência diminui, limite onde o perfil de velocidade média passa a se recompor.

No Século XXI, Ishirara, Fujino e Hibi (2001), desenvolveram uma pesquisa acerca de medições e previsão do campo de vento em terrenos complexos. Um dos principais resultados dessa investigação foi atestar que a sonda de fio-quente tipo X, não fornece, com razoável precisão, as características do escoamento na esteira turbulenta, no que se refere à separação e ao escoamento reverso. O autor comprovou que esse tipo de sonda superestima a componente longitudinal da velocidade e subestima as componentes laterais e verticais da turbulência, próximas à região da esteira.

A pesquisa de Takahashi et al. (2002) analisou as características de um escoamento bidimensional de camada limite turbulenta sobre um morro isolado, em um modelo de escala 1/1000 com superfície rugosa, contendo dimensões equivalentes a uma altura de 200 m e comprimento em escala plena de 1.256 m. A experiência foi conduzida em túnel de vento sob condições neutras, empregando para registro da velocidade, um anemômetro de fio quente de temperatura constante. As três componentes do vetor velocidade foram medidas com

sondas *split-fiber*¹⁴ com 1,25 mm de comprimento e 70 µm de diâmetro. As análises das medições incluíram velocidade média, velocidade turbulenta, esforços de Reynolds e energia turbulenta sobre o morro e região da esteira. Foram empregadas barreiras com diferentes porosidades ($\varphi=0$, $\varphi=50\%$ e $\varphi=100\%$), em obstáculos com alturas desde 20 mm até 50 mm, posicionados a barlavento do modelo em escala. Os estudos mostraram que a velocidade instantânea e a velocidade média atrás de uma barreira de quebra-vento sólida têm diferentes comportamentos. Os resultados obtidos indicaram que:

- a) os perfis de velocidades médias para os tipos de barreira, variam com as disposições dos obstáculos;
- b) a velocidade turbulenta se torna maior na região superior da esteira atrás do morro;
- c) os obstáculos porosos trabalham como fugas do vento e enfraquecem a velocidade do vento próxima à superfície do morro;
- d) os escoamentos instantâneo e médio atrás de uma sólida barreira de quebra-vento tem diferentes variações;
- e) com o estabelecimento de seções transversais de medição para a modelagem física do morro foram identificados o pico de velocidade do vento e a zona de separação e recolamento do escoamento.

As conclusões do experimento deixaram clara a existência de um campo de turbulência, com uma distribuição quase uniforme ao longo da inclinação ascendente do morro, a barlavento e um aumento do campo de turbulência na região da esteira, à sotavento do morro. Nessa região, quando a porosidade da barreira empregada foi de 50%, a velocidade turbulenta foi aparentemente maior que nas demais, contrastando com a velocidade média, que se tornou mais baixa.

Segundo Cattin et al.(2002), especialmente em vales, onde significantes componentes verticais do vento são encontrados, a componente do vento nas duas direções pode ser maior que 5-7 % da velocidade horizontal do vento. Nessas circunstâncias, anemômetros de conchas são falhos na representação da verdadeira condição do vento. Desta forma, quando se trata de um terreno com orografia complexa, ou quando são necessários detalhamentos das medidas

¹⁴ *Split-fiber probe*: sistema destinado a medição da velocidade instantânea e sentido de um escoamento em túnel de vento. É composto por uma sonda que trabalha com dois filmes de níquel colocados em paralelo assentados em um elemento de fibra de quartzo de 200 µm de diâmetro e 3 mm comprimento. (HELLE, 2003).

de turbulência em resoluções espaciais e temporais, metodologias lineares não se aplicam, havendo, além do desenvolvimento de campanhas de medições de superfície, a necessidade de agregar outras ferramentas científicas de investigação para melhor identificação da estratificação do vento local, tais como, túnel de vento e estudos numéricos computacionais.

Segundo o Atlas Eólico do RS (2002), as extrapolações geográficas de uma variável física complexa, como é o movimento estocástico da atmosfera, podem representar uma ampliação nas margens de incerteza a patamares desconhecidos. Modelos lineares de mesoescala oferecem excelentes mapeamentos para áreas planas. Em outras regiões, as condições do vento podem ser obtidas por pura extrapolação, a partir dos dados obtidos em medições praticadas. Por outro lado, comparações efetuadas na prática, indicam que modelos de simulação de camada-limite tais como WASP¹⁵, NOABL¹⁶, Wind Map, podem apresentar erros na ordem de até 25%, quando aplicados em terrenos complexos, conforme Atlas eólico do RS (2002).

Ayotte e Huges (2004) empregaram velocímetro Doppler laser tri-dimensional para capturar o perfil da velocidade em escoamentos sobre morros isolados, variando a inclinação e a rugosidade do modelo, em um túnel de vento. Comprovaram em seu estudo, que os modelos lineares não conseguem estimar a redução do vento e o início da separação do escoamento no pé do morro, sendo claramente inapropriados para terrenos complexos.

Derickson et al. (2004) avaliaram o comportamento do vento em uma grande extensão, desde o cume de um talude até o seu pé, considerando várias inclinações do terreno. Para tanto, foi empregado um instrumento híbrido que contemplou um modelo em túnel de vento e um modelo numérico computacional de mesoescala. Esse estudo concluiu que na presença de um morro, o escoamento se separa dentro de uma extensão, em vários pontos, tanto a barlavento do morro quanto a sotavento, desde o cume até o pé da elevação, dependendo da geometria do terreno e da turbulência do escoamento. Os processos de separação e recolamento do

¹⁵ *WASP: Wind Atlas Analysis and Application Program*. Modelo linear que tem se tornado padrão industrial em modelagem do escoamento em micro escala. Essa modelagem do escoamento é especialmente importante para análise de terrenos complexos. O modelo WASP oferece baixo custo computacional e possibilita previsões climatológicas precisas sobre baixos, morros e áreas planas de pequenas a moderadas dimensões, com inclinações suaves e escoamentos aderidos a superfície. O modelo WASP não é capaz de prever escoamentos descolados da superfície, os quais geralmente ocorrem a sotavento, no lado escarpado do morro. Kjeller (2006) recomenda que o WASP seja empregado com critério em áreas de terreno complexo. Inclinações que excedam 17° são críticas para a aplicabilidade do programa (BWEA, 2009).

¹⁶ *NOABL: Numerical Objective Analysis of Boundary Layer*. O programa utiliza o método de elementos finitos para calcular o campo de velocidade do escoamento. Uma malha tridimensional de pontos do terreno, gerada a partir de coordenadas do mesmo constitui-se a área de domínio do cálculo (BWEA, 2009).

escoamento são altamente transitórios, imprevisíveis e irregulares, como é o caráter do escoamento turbulento, em geral. O comportamento de um escoamento é função das características do terreno, não sendo possível generalizá-lo, o que justifica a necessidade de serem desenvolvidos estudos caso a caso. Essa posição é também defendida por Miller (1995) e por outros pesquisadores tais como Ishirara, Hibi e Oikawa (1999).

Derickson et al. (2004) estabeleceram uma metodologia para a aferição dos fenômenos do vento, desencadeados por um escoamento em um talude. As componentes médias e flutuantes da velocidade do vento foram avaliadas em seções transversais de locação, desde o limite da borda do talude, espaçadas de 10 m, bem como na seção mediana dessa formação geográfica, em um modelo em escala, em túnel de vento, com várias declividades, conforme Figura 1.

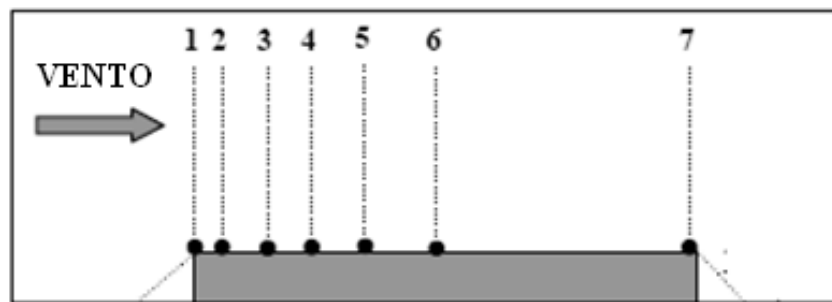


Figura 1 - Locação de seções transversais para análise dos perfis de vento em um talude com platô (Derickson et al.,2004).

Segundo o mesmo autor, em sua pesquisa em um platô, em inclinações de 30° , 60° e 90° em um talude, foram identificadas duas situações principais: deslocamentos ascendentes e/ou carregamentos assimétricos em equipamentos instalados nas posições 1 e 2 da Figura 1, dependendo da distância da borda e da inclinação do mesmo. Foi identificada a ocorrência de zonas de turbulência próximo às bordas e extremidades de taludes íngremes, onde também se verifica a separação do escoamento.

Taludes com pouca inclinação, até 17° , que produzem pequenas ou nenhuma separação do escoamento, podem ser excelentes alternativas para instalações eólicas, segundo Cook (1985). Para inclinações de taludes entre 60° e 90° , em distâncias superiores a 20 e 30 m da borda, evidenciou-se uma significativa diferença nos perfis de velocidade média entre as locações de 2 a 5 nos moldes da Figura 1. Conforme aumenta distância da borda a barlavento, reduzem-se as diferenças nos perfis de velocidade média, conforme constatado nas locações 6 e 7 da Figura 1.

A experiência supramencionada deixa claro para áreas dessa natureza, as assertivas que seguem:

- a) o ponto de máxima velocidade vertical do vento desloca-se para cima, à medida que a distância da borda aumenta;
- b) a componente vertical da velocidade é maior para inclinações de 90° em medições efetuadas a distâncias entre 20 e 30 m da borda. Ainda a 40 m da borda, a componente vertical do vento é grande, o que pode representar condições aerodinâmicas nefastas a um aerogerador colocado nessa posição;
- c) comparando-se a velocidade média a 60 m da superfície entre as duas inclinações de taludes analisadas, 60° e 90° , foi verificado que este parâmetro é da ordem de 4,8 m/s para 90° e 9,3 m/s para 60° para uma altura padrão de comparação. Pode-se tomar a diferença entre as velocidades encontradas como um fator de 2, o que leva a um fator de 8 na potência do vento;
- d) na locação 3, as diferenças nas velocidades médias do vento entre as inclinações analisadas 60° e 90° , são, para a mesma altura de medição, da ordem de 4,2 m/s para 60° e 6 m/s para 90° ;
- e) analisando-se a inclinação de 30° , as locações de 1 a 5 registraram significantes diferenças a maior nos perfis de velocidade média e a menor na turbulência, comparados com as inclinações de 60° e 90° , particularmente nos 100 m acima do solo. Fica claro que esta inclinação apresenta a melhor vantagem dentre as estudadas, 30° , 60° e 90° para instalações de geração de energia a partir da fonte eólica, beneficiando-se dos efeitos da velocidade incremental do vento. Os taludes de 60° e 90° desencadeiam a separação do escoamento, o que reduz a velocidade média com o aumento da turbulência. O estudo pontua a conclusão de inclinações maiores determinam uma importante componente vertical do vento incidente na aresta frontal da característica topográfica que pode ser problemática para os aerogeradores, em termos de um carregamento assimétrico nos mesmos.

O estudo de Li et al. (2005) investigou a extensão da ocorrência da velocidade incremental do vento nos contornos de cumes e taludes em três inclinações topográficas: 15° , 30° e 60° . Em uma de suas conclusões sugerem que, em termos absolutos, os efeitos crescentes da velocidade incremental do vento são mais baixos em taludes do que em morros, para todos os graus de inclinação do mesmo. Esta máxima contradiz o dito nos códigos australiano e europeu (NGO e LETCHFORD, 2008).

Li et al. (2005) recentemente compararam diferentes metodologias para cálculo dos efeitos topográficos sobre o vento. A saber: European Standard: Eurocode1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN TC 250: 2002; Australian/New Zealand Standard (Norma

Australiana/Neozelandesa) AS/NZS 1170.2: 2002; Architectural Institute of Japan AIJ: 2004; American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95 (ASCE 7-95), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (2005). As normas AIJ: 2004, AS/NZS 1170.2:2002 e CEN TC 250:2002 são associadas ao fator de acréscimo na velocidade, enquanto a norma ASCE/SEI 7-05:2005 é associada ao fator de acréscimo na pressão. Estes fatores são geralmente denominados de fatores topográficos (NGO; LETCHFORD, 2008).

Segundo Molly (2006), no que se refere à viabilidade econômica de um empreendimento eólico, um erro de aproximadamente 10% na medição do vento pode representar uma diferença de até 30% na receita do empreendimento. Além do exposto, existem os problemas ligados à garantia da curva de potência das turbinas instaladas em terrenos complexos. A indústria disponibiliza os equipamentos com a curva de potência garantida da turbina para um local, sob condições pré-estabelecidas. Neste particular, há carência de soluções pragmáticas que visem à determinação da margem apropriada para o emprego da curva de potência garantida pelo fabricante. Dessa forma, a viabilidade dos projetos eólicos fica sujeita ao completo entendimento dos citados fenômenos conexos à velocidade do vento, o que pode ser suprido por meio de modelos de simulação.

Consoante Kjeller (2006), o modelo linear WASP, oferece previsões climatológicas precisas para terrenos planos, podendo contemplar morros baixos e planos de pequenas a moderadas dimensões, com inclinações suaves de até 17°. Entretanto, para inclinações maiores, o modelo passa a não ser confiável em áreas onde é esperado o deslocamento do escoamento, a sotavento do morro. De acordo com Cattin et al. (2002), o perfil da velocidade do vento em terreno complexo não segue uma curva potencial como ocorre em terrenos planos. Miller (1995), em seu estudo numérico e experimental do escoamento sobre morros baixos e isolados, desenvolvido em uma cadeia de ondas sinusoidais periódicas, afirma que o perfil da velocidade média do vento, em uma área complexa, obedece ao perfil logarítmico apenas em alturas acima da superfície dos cumes dos morros. Miller (1995) complementa que, em estudos de campo, apenas pequenas frações da altura do terreno subjacente, acima da superfície medida, apresentam comportamento logarítmico.

O estudo comparativo dos resultados entre os três métodos, medições de campo, modelagens matemáticas, estudos numéricos computacionais e físicos, em túnel de vento, mostra os valores obtidos para as acelerações no cume do morro e comprova as diferenças entre os métodos empregados, conforme Tabela 1 (TEUNISSEN, 1983).

Tabela 1 - Estudo comparativo entre os resultados para a velocidade incremental do vento no cume do morro sob o enfoque de três métodos: metodologias de campo, modelos matemáticos e modelos em túnel de vento (TEUNISSEN, 1983).

Direção do vento	Altura "z"	Medições a campo	Modelo matemático	Modelo de túnel de vento	2 d/L
245°	10 m	0,40	0,33	0,33	0,47
	10m	0,34	0,33	0,33	0,47
	3 m	0,31	0,33	0,39	0,47
220°	10m	0,64	0,61	-	0,62

Há um valor preciso para o comprimento de rugosidade " z_0 ", o qual pode sofrer variação espacial em áreas sujeitas a esforços advindos de ventos ascendentes, que influenciam as características do escoamento como um todo e acarreta consequências no cálculo da potência do vento, para todo o tipo de projeto.

Rasouli, Hangan e Kamran (2007), pela primeira vez, empregaram velocimetria por imagem de partículas para identificar o perfil da velocidade em um escoamento bi-dimensional, horizontal e verticalmente sobre uma área com topografia complexa.

Kjeller (2006) desenvolveu simulações numéricas computacionais, empregando quatro

modelos de turbulência: o modelo $k-1$ ¹⁷, modelo $k-\varepsilon$ padrão, o modelo $k-\varepsilon$ RNG e o modelo de tensões de Reynolds. Uma das conclusões do estudo foi que a velocidade no cume do morro é quase duas vezes a velocidade a barlavento do morro e que na esteira deste, a sotavento, existe uma recirculação com velocidades entre 0 e 1 m/s. Esse autor comparou seu modelo ao de Askervein e entendeu que a zona de separação de um escoamento tridimensional tende a ter baixa velocidade e alta turbulência. Diz ainda que o fenômeno da turbulência é ainda o maior desafio na modelagem não-linear em microescala.

Rasouli, Hangan e Kamran (2007), em uma investigação de um escoamento sobre dois modelos de topografias complexas (cumes de morros e vales) e constataram que existiam grandes diferenças entre os campos de velocidade instantânea e velocidade média entre os experimentos. O campo de escoamento instantâneo para o campo do escoamento médio, em

¹⁷ O modelo de turbulência *k-epsilon* inclui duas equações de transporte específicas para representar as propriedades de um escoamento turbulento. A primeira variável transportada é a energia cinética turbulenta. A segunda variável transportada é a dissipação turbulenta. Esta última determina a escala da turbulência enquanto a primeira determina a energia da turbulência.

cumes, varia significativamente em cada posição. Resulta disso, o fato de o escoamento em cumes não ser estacionário, sendo, desta forma, mais complexo.

A interpretação dos efeitos topográficos na construção da C.L.A. tem sido atualmente enfrentada através do desenvolvimento de metodologias com duas ou mais técnicas associadas. Estas, em suas diferentes interpretações, representam a tentativa de construir modelos matemáticos que inter-relacionem as variáveis físicas existentes em cenários orográficos complexos, de modo a estabelecer um critério de previsibilidade de ocorrência e de magnitude dos fenômenos geofísicos existentes nesses cenários. Os modelos matemáticos explorados nos modelos analíticos focam, principalmente, a combinação dos efeitos topográficos terreno (rugosidade) / altura, traduzidos em um único parâmetro a ser acrescido à velocidade do vento, dimensionando a variação desta de acordo com as características topográficas, denominado multiplicador topográfico.

Wang e Stathopoulos (2007) analisaram o escoamento ao redor de uma barreira vertical porosa, empregando métodos computacionais para analisar os efeitos da turbulência no escoamento. O experimento variou as condições de aproximação do escoamento e a porosidade da barreira para a determinação das características da esteira a sotavento do anteparo. Constataram que a separação se inicia a partir das extremidades pontiagudas da barreira e a formação dos vórtices ocorre a sotavento da mesma. Acima do topo da barreira, as linhas de corrente descolam-se e projetam-se para cima, produzindo um aumento da velocidade a sotavento. Os vórtices tendem a se alongar com o aumento da porosidade da barreira, para as mesmas condições de escoamento médio. Após o escoamento passar pelos poros da barreira, a continuidade deste é instável. Por outro lado, a magnitude da velocidade acima da ponta da barreira tende a decrescer. Em um último estágio, a força de arrasto é reduzida e a espessura da camada limite do escoamento é aumentada.

A pesquisa de Ngo e Letchford (2008) é centrada na comparação da interpretação dos efeitos da interferência das características topográficas na velocidade de rajada do vento, sob a ótica de quatro normas técnicas, analisando a combinação terreno/altura e multiplicador topográfico. As comparações efetuadas por Ngo e Letchford (2008) mostram que a ASCE/SEI 7-05 analisa, além dos efeitos da velocidade incremental do vento sobre e no entorno de formas topográficas e as condições do terreno circunscrito as mesmas. O ASCE/SEI 7-05 é a única norma que considera a influência da rugosidade do terreno no aumento da velocidade do vento. As demais não incluem esta característica do terreno nos efeitos do escoamento.

Salientam também que o ASCE/SEI 7-05, o AS/NZS 1170.2:2002 e o CEN TC 250:2002 constituem as características de morros e vales identicamente. Ainda, segundo os referidos autores, há uma variação muito grande na interpretação de tais normas, considerando os limites de declividade que determinam as zonas de separação do escoamento constantes na Tabela 2. Ngo e Letchford (2008) entendem que os perfis de vento sobre características topográficas obtidos pela norma AS/NZS 1170.2: 2002 são consistentes, sendo que eles incluem os efeitos da não linearidade do escoamento, quando a declividade das características do terreno é menor que 5%. Nessa norma, o problema parece ser o fato de que diferentes formas topográficas não mostram variação tão significativa no efeito da velocidade incremental do vento quanto aquelas demonstradas pela norma ASCE/SEI 7-05, resultando na inexistência de substanciais diferenças na consideração de morros e cumes. Por outro lado, a norma AIJ: 2004, diferentemente de outros códigos, supõe que os efeitos da velocidade incremental do vento dependem da inclinação topográfica, até 60° ou declividades maiores que 173,2%. Esse valor é bem maior que o sugerido por Cook em 1985, para o qual o limite para a separação do escoamento ascendente foi de 30% de declividade.

Na Tabela 2, constam os limites de declividade superior e inferior, considerados entre os quatro códigos analisados.

Tabela 2 - Variação dos limites de declividade (%) entre as normas ASCE/SEI 7, AS/NZS 1170.2, AIJ:2004, CEN TC 250.

	ASCE/SEI 7	AS/NZS 1170.2	AIJ:2004	CEN TC 250
Limite Inferior	10	5	13,2	5
Limite Superior	25	45	173,2	30

O padrão AIJ (2004) considera para os efeitos da velocidade incremental do vento, o limite inferior de 13,2% de declividade. Esse valor é mais alto que o correspondente 10% no padrão ASCE/SEI 7-05 e 5% nos padrões AS/NZS 1170.2:2002 e CEN TC 250:2002. O limite superior da declividade, de 173% é também especificado pelo AIJ: 2004 para a formação das zonas de separação. Esse padrão é o único que considera o decréscimo na velocidade do vento na região da esteira.

Ngo e Letchford (2008) enfatizam a disparidade nas considerações para a identificação dos fatores topográficos dos padrões elencados. O exposto leva ao entendimento de que uma das

maiores conclusões do autor é a necessária revisão dos códigos de carga de vento para a questão.

Sherry, Jacono e Sheridan (2010) investigaram experimentalmente a zona de recirculação que se forma a barlavento de um objeto retangular por ocasião da incidência de um escoamento. A partir da incidência de um escoamento a barlavento sobre um obstáculo, ocorre um bloqueio à pequena distância deste, causado pela pressão gradiente adversa, com a conseqüente separação do escoamento a barlavento, em uma distância horizontal de, aproximadamente, 1 a 1,2 h, sendo "h" altura da face do degrau imerso no escoamento. O recolamento ocorre aproximadamente 0,6 d acima da superfície do mesmo, sendo "d" a altura morro. Estudos similares a este ainda são em menor número em relação àqueles que investigam esta mesma formação, a sotavento do objeto (LECLERCQ; LOISOT; TALOTTE, 2001).

Kozmar (2011) investigou os efeitos de escala de comprimento em uma simulação do escoamento da C.L.A. em túnel de vento, considerando área urbana e escalas de comprimento 1:400, 1:250 e 1:220 e comparou os resultados com cálculos analíticos sugeridos por códigos internacionais. Os parâmetros investigados foram velocidade média, intensidade da turbulência e esforços de Reynolds. Resultados experimentais indicaram ser possível reproduzir o escoamento urbano em túnel de vento em diferentes escalas de comprimento sem significativa influência na simulação da escala de comprimento nas características do escoamento. Entretanto, em túnel de vento não foi possível reproduzir duas das características do fenômeno observado em escala total, quais sejam: dependência da escala de comprimento integral na velocidade do vento de referência e o aumento linear na escala de comprimento integral com a altura. Além disso, nos padrões internacionais não existe convergência dos valores recomendados para características do vento em áreas urbanas. Em particular, escalas de comprimento integral recomendadas no ESDU 85020(1985) são significativamente maiores que em outros padrões.

Com a exposição, para os autores supracitados, (LECLERCQ; LOISOT; TALOTTE, 2001), Ngo e Letchford (2008) e Kozmar (2011) é consensual que a complexa caracterização dos fenômenos geofísicos, a exata localização e extensão de ocorrência dos mesmos, intensidade, previsibilidade e o emprego de parâmetros que inter-relacionam as variáveis físicas que definam estes fenômenos é hoje uma das principais diretrizes da engenharia do vento, tanto para a definição do carregamento devido ao vento sobre estruturas, quanto para o aproveitamento do potencial eólico em locais de orografia complexa. As substanciais

controvérsias na comparação dos números advindos da aplicação das normas em tela para o mesmo fenômeno, tais como inclinações limites para o início da formação das zonas de separação de um escoamento, também ratificam a necessidade do avanço da pesquisa e revisão dos padrões de carga existentes, conforme mostrado na Tabela 2 (NGO; LETCHFORD, 2008).

Passadas quatro décadas, é visível que o entendimento dos efeitos da topografia no escoamento do vento tem-se qualificado substancialmente como resultado de um extensivo trabalho acerca de metodologias complexas e integradas, tais como estudos teóricos, modelagens físicas em túneis de vento e estudos numéricos computacionais, os quais associam-se às medições anemométricas *in loco*.

Da pesquisa consolidada até os dias de hoje, a precisa parametrização e extensão da influência de todas as variáveis geofísicas sobre a construção da C.L.A. em um terreno complexo, parece continuar a ser a questão que ainda merece investigação, provada pelos diferentes entendimentos das normas mundiais que na atualidade versam sobre o tema. O exposto ratifica que apenas a análise *in loco* é capaz de diagnosticar uma área, no que se refere à matéria posta.

3 CAMADA LIMITE

3.1 INTRODUÇÃO

O conceito de uma camada-limite foi introduzido pioneiramente pelo alemão Ludwig Prandtl, em 1904¹⁸, marcando o começo da era moderna da mecânica dos fluidos. Até esta data, o equacionamento das questões ligadas ao escoamento de fluidos admitia que, para todas as situações, a viscosidade " μ " era nula. Prandtl definiu o intervalo em que a mesma é diferente de zero, ao que denominou de camada limite (PETRY, 2002).

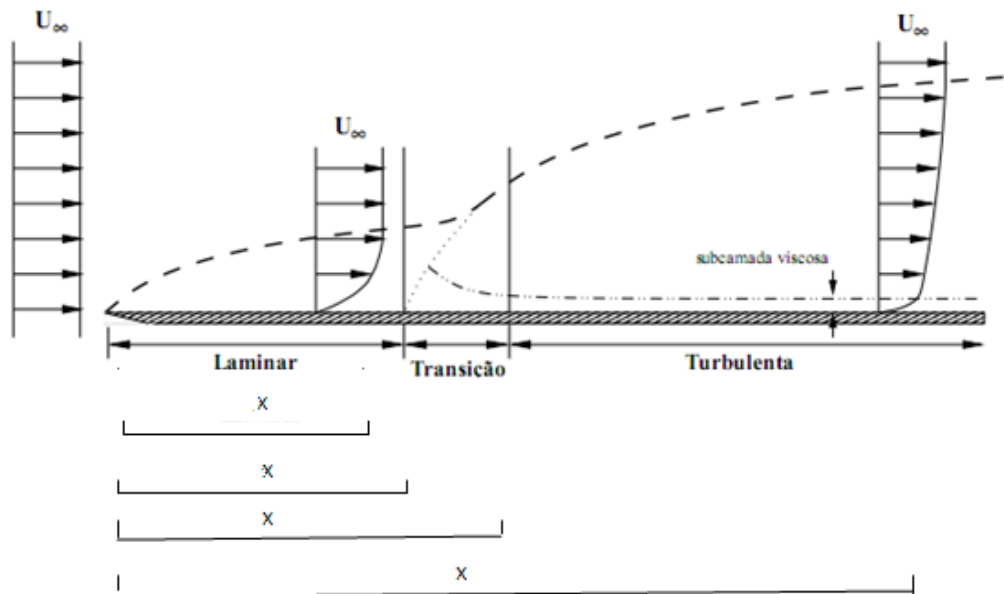
Quando um objeto move-se através de um fluido ou um fluido move-se passando por um objeto, as moléculas desse, próximas ao objeto, movem-se ao redor do mesmo. As magnitudes das forças aerodinâmicas entre o fluido e o objeto dependem da forma desse, da viscosidade e da compressibilidade do mesmo. À medida que o fluido se move ao passar pelo objeto, as moléculas que estão próximas à superfície colam nela e aquelas que estão imediatamente acima da superfície são deslocadas, colidindo com as primeiras. Essa situação ocasiona a criação uma fina camada de fluido próximo à superfície, na qual a velocidade varia desde zero até atingir a velocidade não perturbada, acima da superfície. Esse intervalo de crescimento de velocidade e turbulência foi denominado por Prandtl (1904) de camada limite. Prandtl (1904) entendeu que a fenômeno do escoamento de um fluido em torno de um objeto, gera duas regiões diretamente proporcionais ao número de Reynolds: uma próxima do objeto, onde os efeitos do atrito são muito importantes e uma externa, onde esses efeitos podem ser desprezados.

A constituição da camada limite em um escoamento bidimensional livre sobre uma superfície sólida fina inicia-se com a borda de ataque desse sobre a placa. Distinguem-se três zonas características: na primeira, denominada camada limite laminar, as linhas de corrente se inclinam levemente em relação a placa, mantendo sua linearidade. Inicia-se a formação da camada limite onde o líquido adere por viscosidade ao sólido, a partir da superfície de contato e atinge, na direção normal, em distâncias crescentes, a espessura variável da camada limite até a velocidade não perturbada do líquido $-V_{\infty}$. A espessura da camada limite passa a ser crescente no sentido a sotavento. Esta camada pode se tornar turbulenta, a partir da borda de

¹⁸ À título de curiosidade Theodore von Kármán foi aluno de Prandtl na Universidade de Gottingen.

ataque incidir em uma superfície rugosa. Constata-se na decorrência do processo, a existência de uma região de transição que se estende até o local onde o escoamento da camada-limite torna-se inteiramente turbulento¹⁹ e onde o movimento não é permanente, sendo a velocidade variável em cada ponto. Esta variação evolui para uma zona onde o escoamento é turbulento. A Figura 2 apresenta esquematicamente o processo de formação da camada limite.

Figura 2 - Formação da camada limite (adaptado de BLESSMANN, 1990).



Os comprimentos "x" dependem da massa específica do fluido - ρ , de sua viscosidade cinemática do escoamento - ν e da velocidade do escoamento - V . Esses parâmetros determinam o número de Reynolds - Re_x , em conformidade com a equação 1.

$$Re_x = \frac{xV\rho}{\nu} \quad \text{equação 1}$$

A viscosidade cinemática do ar em condições normais é $0,145 \text{ cm}^2/\text{s}$. Esse parâmetro identifica a transição do escoamento, do regime laminar para o turbulento, sendo este, em geral, para números de Reynolds entre 2000 e 3000. Dentro da C.L.A. o escoamento tende a ser turbulento e o número de Reynolds é correspondentemente alto. As tensões de Reynolds

¹⁹ Escoamentos turbulentos: são caracterizados por apresentarem flutuações de pressão e velocidade superpostas ao escoamento principal. As flutuações são originadas pela passagem de vórtices de várias escalas e as velocidades variam ao longo do tempo em torno de um valor médio.

representam as tensões resultantes das flutuações de velocidade e, conseqüentemente, da quantidade de movimento do fluido no escoamento.

3.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

O vento é o resultado das diferenças de pressão entre as massas de ar que fluem sobre a superfície da terra. A C.L.A. pode ser definida pelo perfil de variabilidade da velocidade do vento, o qual é proporcional aos elementos físicos que retardam o escoamento, tais como o arrasto, evaporação, evapo-transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e alterações, gerados pela topografia e/ou pelos obstáculos localizados na superfície (LOREDO-SOUZA et al, 2004). A estrutura do vento é principalmente determinada pela natureza da superfície subjacente e pelo gradiente vertical de temperatura do ar. Dentro da C.L.A., através de dispersões, ocorre intercâmbio de quantidade de movimento entre camadas horizontais do ar, em que a energia é transferida, a partir de escoamentos de alta energia, situados em níveis mais altos, para escoamentos situados nas camadas inferiores, chegando sua velocidade na superfície igualar-se a zero. A transferência de quantidade de movimento na C.L.A. é ocasionada pelas tensões de Reynolds, $\overline{u'w'}$ que definem as principais estruturas dentro da C.L.A.: camada superficial e a camada de Ekman²⁰. A primeira é a região dentro da C.L.A. mais próxima da superfície, onde o movimento do ar é altamente irregular e é caracterizado por flutuações, vórtices ou turbilhões. Dentro dessa camada existe uma fina subcamada denominada subcamada interfacial ou microcamada, onde o transporte é maior que o transporte turbulento. A espessura da subcamada é denominada de deslocamento do plano zero - z_d (BLESSMANN,1995). Pequenas flutuações associadas às altas frequências são desencadeadas, principalmente, pela turbulência, uma vez que a estrutura da C.L.A. responde às características topográficas do entorno, por menores que elas sejam (SABATINO et al., 1998). A turbulência que é principalmente de origem mecânica, é originada pelos efeitos do arrasto sobre a superfície, e também é térmica, ocasionada pelos fluxos de calor que acarretam os movimentos convectivos, os quais determinam as rápidas alternâncias na velocidade do vento, em uma larga faixa de frequências e amplitudes, comumente denominadas rajadas (BLESSMANN, 1990). Nessa camada, onde os efeitos do atrito da superfície dominam, os

²⁰ Camada de Ekman: também chamada de camada em espiral. Esta camada mostra um decréscimo das tensões de Reynolds com a altitude até praticamente se anularem na região da altura gradiente (LOREDO-SOUZA, SCHETTINI; PALUCH, 2004).

efeitos da rotação da Terra e a força de Coriolis podem ser negligenciados. A Camada de Ekman é traduzida por um decréscimo das tensões de Reynolds de acordo com a altitude até tornarem-se nulas na altura gradiente.

Segundo Arya (1988), os fatores abaixo são determinantes na distribuição do vento dentro da C.L.A.:

- a) a camada limite atmosférica é essencialmente influenciada pelos movimentos atmosféricos de grande escala que são ajustados em resposta às variações espaciais da pressão e temperatura do ar;
- b) as características da rugosidade da superfície, as quais determinam o arrasto superficial e a troca de movimento na parte inferior da C.L.A.;
- c) a rotação da terra, a qual atua na variação do vento com a altura;
- d) o ciclo diurno de aquecimento e resfriamento da superfície, o que determina a estratificação térmica da C.L.A.;
- e) a profundidade da C.L.A., a qual determina os esforços tangenciais ou de corte na C.L.A.;
- f) o arrasto do escoamento livre para dentro da C.L.A., o qual determina o movimento, calor, e as trocas de umidade no cume da C.L.A., bem como a altura da C.L.A.;
- g) as advecções²¹ horizontais de movimento e calor, as quais afetam tanto a distribuição do vento, quanto da temperatura na C.L.A.;
- h) a convergência ou divergência horizontal em grande escala e o movimento vertical médio resultante no topo da C.L.A.;
- i) a presença de nuvens e precipitação na C.L.A., as quais influenciam sua estratificação térmica;
- j) a característica topográfica da superfície, a qual dá um acréscimo na circulação local ou de mesoescala.

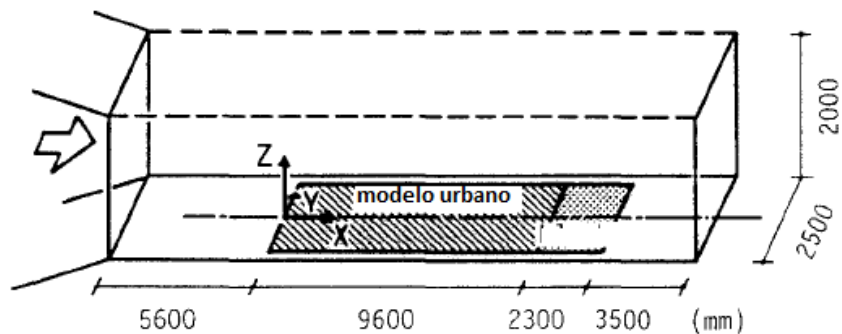
Strataridakis, White e Greis (1998), atestam convergentemente em sua investigação acerca da identificação dos fenômenos internos da C.L.A. em um escoamento sobre superfícies complexas, que estes, influenciados pelos esforços de Reynolds, desencadeiam trocas

²¹ Advecção: transmissão do calor pelo deslocamento horizontal do ar

verticais de movimento devido à turbulência e às flutuações da mesma, as quais são de ocorrência e intensidade aleatória.

Maruyama e Ishizaki (1988) objetivando investigar as características do vento sobre uma área urbana, desenvolveram um experimento em um túnel de vento de camada limite. Empregaram um túnel aberto, com dimensões da seção de trabalho: 2,5 m, 2 m de altura e 21 m de comprimento. O modelo em escala ensaiado foi feito em madeira. O modelo foi fixado ao solo da seção de teste por meio de parafusos. A Figura 3 mostra o modelo urbano de Maruyama e Ishizaki (1988) na seção do túnel de vento.

Figura 3 - Modelo urbano de Maruyama e Ishizaki (1988) em túnel de vento.



Os autores definiram como espessura da C.L.A., denominada altura gradiente, a altura na qual a velocidade média alcança 99% da velocidade do escoamento livre. O crescimento da camada limite para modelos urbanos foi mostrado através da relação entre a espessura da mesma - δ e extensão horizontal percorrida pelo vento - x_* , em conformidade com a equação 2 e a Figura 4.

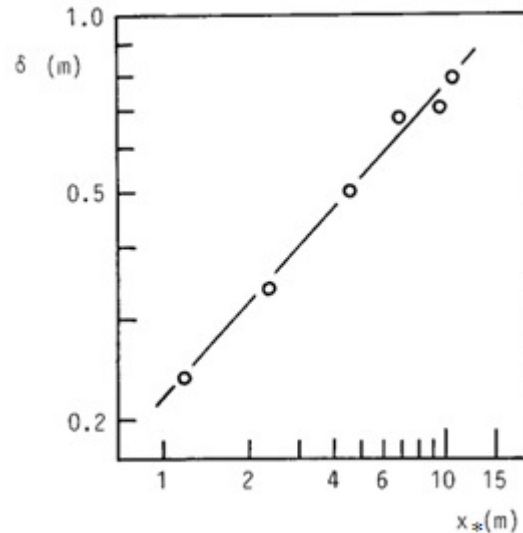
$$\delta = x_*^{0,56} \quad \text{equação 2}$$

Onde:

δ - espessura da camada limite;

Maruyama e Ishizaki (1988) mostram na Figura 4, a relação entre a espessura da camada limite e a extensão horizontal percorrida pelo vento - x para modelos urbanos.

Figura 4 - Crescimento da camada limite em modelos em escala urbanos segundo Maruyama e Ishizaki (1988).



Nos resultados em túnel de vento de Antonia e Luxton (1971), as taxas de crescimento da camada limite foi $\delta = x_*^{0,72}$ onde x_* é a extensão horizontal percorrida pelo vento, conforme Figura 4.

Por outro lado, Fujimoto et al. (1980) mostraram o crescimento da camada limite sobre blocos uniformemente distribuídos. Para esta situação obtiveram valores de $\delta = x_*^{0,64}$. Maruyama e Ishizaki (1988) concluíram que o coeficiente de arrasto e a velocidade de fricção para determinar o perfil de vento sobre uma área urbana dependem da configuração, tamanho e densidade da rugosidade dos elementos de entorno.

A espessura da camada limite, depende de vários fatores, principalmente das propriedades do fluido, da maneira como as partículas de ar se movimentam, da distribuição espacial da rugosidade da superfície, da estratificação da temperatura do ar e da orografia do terreno (HIRATA; ARAÚJO, 2000). Acima da C.L.A., a velocidade do escoamento passa a ser determinada, unicamente, pelo campo de pressão e pela latitude, tornando-se o escoamento independente da influência da superfície (STRATARIDAKIS; WHITE; GREIS, 1998). A C.L.A. pode variar em torno do nível de 1.000 metros de altura acima do solo (TROEN; PETTERSEN, 1989), dependendo da rugosidade do terreno e das condições atmosféricas, conforme Figura 5. Para ventos fortes, um valor típico de z_g é 2.500 m, de acordo com a rugosidade e com a extensão horizontal percorrida pelo vento (BLESSMANN, 1990).

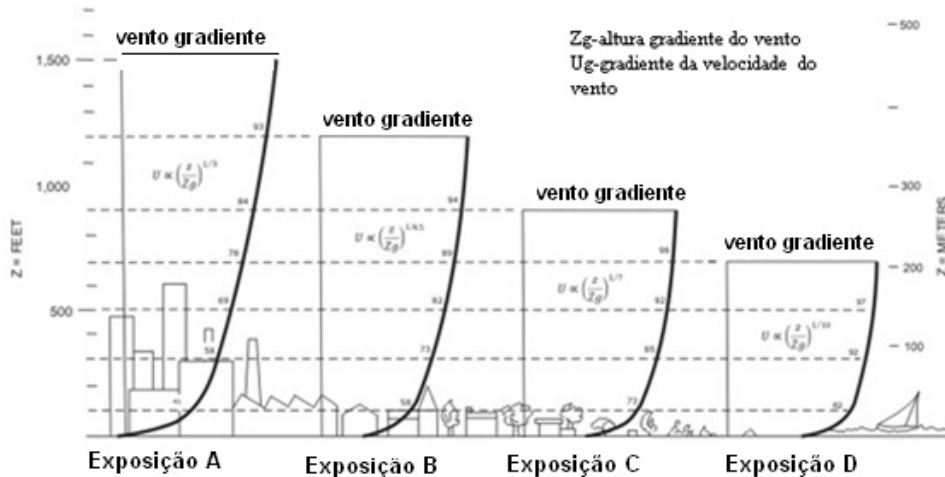
Segundo Loredo-Souza, Schettini e Paluch (2004, p.137):

Para ventos fortes, com velocidades médias horárias superiores a 10m/s, o escoamento é suficientemente turbulento para que a mistura produzida suprima os efeitos térmicos e a C.L.A. possa ser tratada como sendo adiabática e neutramente estável. Estas hipóteses podem ser aplicadas à maioria dos escoamentos de interesse de simulação em túnel de vento.

São os fenômenos intercorrentes dentro da C.L.A. que demandam o interesse do estudo do comportamento do vento em suas mais variadas aplicações.

A Figura 5 mostra perfis de camadas-limite para diferentes categorias de exposição.

Figura 5 – Camadas - limite para diferentes categorias de exposição (BLESSMANN, 1995).



3.2.1 Escoamento sobre Terrenos Planos

3.2.1.1 Escoamento sobre Terrenos Planos Homogêneos

O mais simples tipo de terreno é aquele que pode ser descrito como plano e quase homogêneo em relação às características da superfície do entorno que influenciam o escoamento da camada limite, tais como o tipo de solo, uso da terra, rugosidade, umidade, etc. A estrutura da turbulência sobre superfícies planas e homogêneas sob várias condições atmosféricas é dominada desde os resultados experimentais publicados a mais de duas décadas passadas.

Nessa caracterização, a advecção pode ser negligenciada e o sistema pode ser considerado em equilíbrio local.

A estrutura vertical da C.L.A. e, portanto, o perfil vertical das variáveis meteorológicas é principalmente determinado pelos escoamentos turbulentos de superfície, de movimento, calor e umidade, como determinado pela Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (STULL, 1988; GARRATT, 1992; KAIMAL; FINNIGAN, 1994).

O escoamento atmosférico sobre terrenos planos e homogêneos pode ser descrito por modelos simples de uma dimensão sendo os perfis de vento e temperatura estimados em bases de parametrizações simples (FINARDI; MORSELLI; JEANNET, 1987).

3.2.1.2 Escoamento sobre Terrenos Planos Não-homogêneos

Terrenos planos e não-uniformes são aqui entendidos como aqueles compreendidos por uma porção de água (lagoa ou mar) e terra, tais como regiões costeiras ou transições entre zonas urbana e rural. Circulações características locais em nível de mesoescala são observadas sobre esses terrenos. As diferenças nos aspectos de terrenos são refletidas em variações horizontais de temperatura de superfície e em escoamentos turbulentos. A não uniformidade moderada pode causar o crescimento da camada limite, devido aos efeitos de advecção (por exemplo, variações na extensão da rugosidade), enquanto gradientes horizontais fortes, dão crescimento na circulação em 3D (KAIMAL; FINNIGAN, 1994; STULL, 1988).

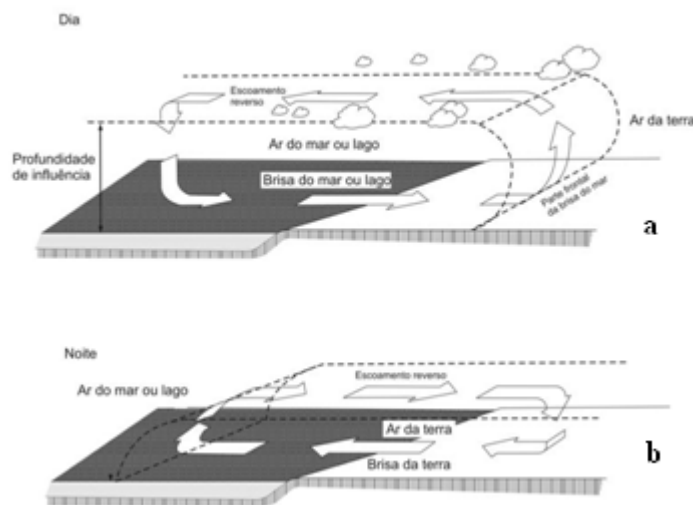
Importantes exemplos de circulações geradas pela não-uniformidade dos escoamentos de superfície são as brisas terra/mar e vice-versa, bem como as ilhas de calor urbano. A primeira é uma circulação termicamente originada pelas diferentes propriedades térmicas da água e da terra. A terra aquece mais rapidamente e a temperaturas mais altas que a água e resfria mais rapidamente e a temperaturas mais baixas que a água. O calor específico (quantidade de calor necessária para aumentar de 1° C de 1g da substância) é quase 3 vezes maior para a água que para a terra.

O ar sobre a terra aquece e expande-se mais rapidamente do que sobre a água, causando o desenvolvimento de um sistema de pressão que induz à circulação dirigida do mar à superfície da terra (brisa do mar) e da terra para o mar, em níveis mais elevados (escoamento de retorno). A circulação é fechada pela moção vertical ascendente sobre a moção da terra,

descendente sobre a água. Durante a noite, a terra esfria mais rapidamente do que o mar e o gradiente horizontal de temperatura gerado causa o desenvolvimento da circulação reversa da brisa da terra, com relação à brisa do dia. Durante o dia, a brisa do mar tem uma extensão vertical e horizontal maior, e as velocidades dos seus ventos são mais altas que a da brisa noturna da terra. Dessa forma, para avaliar as variações na temperatura do ar, deve-se examinar as características da superfície, que reflete e absorve energia solar em quantidade diferente.

A recirculação de poluentes emitidos próximos a áreas costeiras, acrescentam a complexidade do cenário de duas maneiras: através de um processo de advecção no sentido terra-brisa do mar são levantados pelo ar crescente da brisa do mar no sentido frontal durante o dia e de retorno do mar, em um escoamento em nível mais alto, a noite, conforme Figura 6.

Figura 6 - Circulações do tipo brisa entre terra e o mar no dia (a) e à noite (b) (OKE,1987).



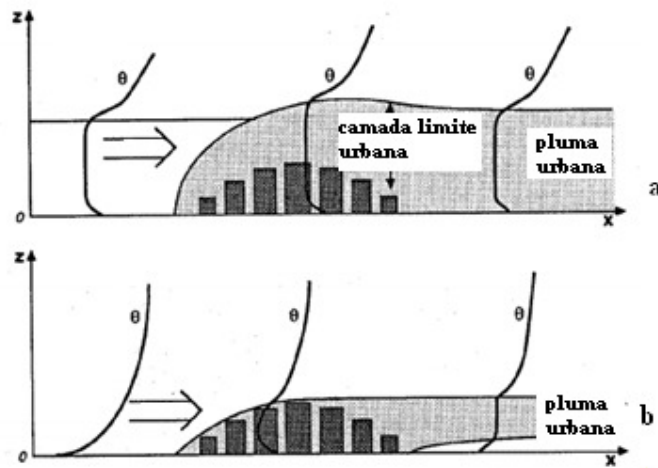
Essas brisas têm sido observadas mesmo em caso de lagos pequenos. As direções de vento da brisa da terra e do mar são influenciadas pela força de Coriolis (FINARDI; MORSELLI; JEANNET,1987).

A ilha de calor urbano é o fenômeno causado pelo maior aquecimento do ar, em relação ao campo. Segundo Oke (1987), podem ser fontes do aumento do calor da superfície, a estação do ano, localização geográfica, características urbanas e a própria atividade humana. Em condições regulares, a ilha de calor gera uma circulação que é caracterizada pela elevação do ar quente sobre a cidade e a convergência dos ventos da superfície, provenientes do campo

para o centro da ilha de calor urbano. O desenvolvimento da circulação vertical nos locais em tela é condicionado pela estabilidade atmosférica. Esses processos foram documentados na costa leste da Espanha por Millan et al. (1992) e em Vancouver por Steyn et al. (1995).

A estratificação urbana modifica as características da camada limite, em conformidade com a Figura 7 e a pluma é transportada para fora da densificação urbana. Os escoamentos abaixo esboçados são exemplos clássicos dos problemas de dispersão em nível de mesoescala. (de 20 - 200 km), sendo também importantes em escala menores de dispersão.

Figura 7 - Esboço da camada limite urbana e a pluma urbana de dia (a) e de noite (b) (STULL, 1988).



Para avaliar as condições de dispersão de poluentes, a análise das características de um escoamento tridimensional e seu tempo de evolução é de fundamental importância, devido aos aspectos da não-homogeneidade e não-estacionariedade do escoamento (FINARDI; MORSELLI; JEANNET, 1987).

3.2.2 Escoamento sobre Taludes e Morros Isolados

O estudo da formação da camada limite turbulenta que ocorre em áreas caracterizadas por grande variabilidade topográfica, tais como morros e taludes e/ou com igual comportamento da rugosidade superficial é determinante quando se tem em questão o transporte de poluentes, o aproveitamento de locais para prospecção eólica ou o dimensionamento do vento como carga em edificações localizadas proximamente aos terrenos complexos. Basicamente, o

escoamento sobre morro isolado pode ser definido com uma desaceleração a barlavento, a ocorrência da velocidade incremental do vento sobre o cume, ocasionado pela aproximação das linhas de corrente do vento e a formação, a sotavento, de uma região denominada esteira de recirculação, localizada no pé do morro (JACKSON; HUNT, 1975). A velocidade incremental do vento que ocorre no cume do morro e a definição da extensão da esteira de recirculação e recolamento do escoamento, determinam o aproveitamento de áreas complexas.

Conforme Taylor e Teunissen (1983) e Derickson et al. (2004), quando a característica topográfica é suficientemente abrupta, no entorno de 30 a 40 % há o surgimento de um forte gradiente de pressão adverso, o qual ocasiona a desaceleração junto à base de barlavento. Esse fato dá origem ao escoamento com gradiente local de velocidade adversa. Deste modo, para haver a separação do escoamento é preciso que existam física e matematicamente duas condições que definam os pontos críticos de descolamento do escoamento: tanto a velocidade média quanto o seu gradiente devem ser nulos, simultaneamente, em um ponto. Esses pontos críticos são chamados “pontos de separação”, ou seja, quando as linhas de corrente deixam a superfície dando origem às áreas de instabilidade do escoamento e à turbulência. Para colinas suaves típicas $d/L \leq 0,3$, a espessura da região de separação é comparável à espessura da região interna (TAYLOR; TEUNISSEN, 1983) e a região externa não é modificada significativamente. À medida que a declividade aumenta, a ocorrência da região de separação do escoamento tende a se aproximar do topo. Como descrito em Belcher e Hunt (1998), para escoamentos turbulentos e encostas íngremes, a altura da região descolada torna-se comparável à altura do próprio morro. Quando as linhas de corrente voltam a aproximar-se, estabelecem-se os pontos de recolamento.

Arya e Shipman (1981), através de dados experimentais de um escoamento bidimensional sobre um cume triangular atestaram que o ponto de recolamento das linhas do mesmo ocorre em uma extensão aproximadamente igual $13d$, sendo " d " a altura do morro. Os mesmos autores comparam esta medida experimental com as correspondentes obtidas pelos modelos de turbulência – Modelo $k-\varepsilon$ e Modelo $k-\omega$, sendo essas, respectivamente, $9,8d$ e $11,5d$. O exposto permite a dedução que, nas condições postas, o ponto de recolamento avaliado por mais de um método, varia entre $9,8d$ a $13d$, sendo " d ", a altura morro.

Wittwer (2006) investigou o escoamento complexo em uma zona urbana e identificou que a principal modificação com relação ao escoamento incidente ocorre no perfil de velocidade média. A configuração do perfil se afasta da lei potencial, mesmo considerando-se o expoente

$\alpha = 0,45$. Apesar deste comportamento observado nas velocidades médias, os valores do desvio padrão das flutuações e os espectros correspondentes não se afastam muito dos obtidos para o vento incidente. As variações na velocidade média foram da ordem de 30 %.

No que se refere a metodologia da avaliação dos recursos do vento e localização de aerogeradores em sítios eólicos, pode-se dizer que a mesma tem agregado aos estudos de campo, obtidos por estações anemográficas compostas por anemômetros de copos e ventoinha, programas baseados em modelos lineares da Mecânica dos Fluidos (JACKSON; HUNT, 1975; MASON; SYKES, 1979). Entretanto, esta prática provou a viabilidade de seu emprego limitada a terrenos relativamente planos, sendo capaz de resolver o escoamento, tanto a barlavento quanto a sotavento apenas para pequenas declividades, até 30% (AYOTTE; HUGHES, 2004). Apesar dessas limitações técnicas, os parques eólicos tendem a ser instalados em terrenos de crescente complexidade. Nesses cenários, especificamente em alturas maiores, como os píncaros dos morros, em que pese possa existir maior potencial eólico, ocorre a separação do escoamento, a componente vertical do vento pode ser alta e a instabilidade do escoamento podem ser aspectos determinantes do aproveitamento dessas áreas. Nessas situações, modelos lineares não são apropriados. Nestes casos, modelos não-lineares da Dinâmica dos Fluidos Computacional e estudos em túneis de vento constituem-se em ferramentas capazes de investigar as alterações do escoamento em áreas complexas. Os efeitos do escoamento em cada tipo de característica topográfica passam a ser analisados conforme segue.

3.2.2.1 Morros Isolados

Deaves, Jackson e Hunt focaram sua investigação no estudo da modelagem do escoamento considerando cumes e taludes bidimensionais. Este modelo evoluiu para uma análise do escoamento tridimensional por Mason e Sykes, aplicado a morros. A maior limitação dos modelos bi-dimensionais permanece sendo a definição da região de separação do escoamento, sendo suas aplicações restritas a inclinações nas quais a separação não ocorre. Embora estes modelos não produzam dados suficientes para projeto, são empregados na previsão do comportamento geral do escoamento (COOK, 1972). O problema pode ser apenas resolvido na atualidade mediante dados ajustados observados em modelos empíricos. Dados coletados em pesquisas de modelos em escala são usualmente comparados com modelos numéricos, resultando, em geral, conclusões convergentes entre as duas metodologias.

O comportamento da velocidade do vento e da turbulência em um escoamento de camada limite turbulenta sobre um baixo e isolado morro, analisado bidimensionalmente com rugosidade superficial " z_0 ", uniforme e negligenciável, relativamente à extensão horizontal da elevação mencionada, sem separação do escoamento, em condições neutramente estáveis, nos quais as equações do movimento podem ser linearizadas, foi definido primeiramente no modelo analítico de Jackson e Hunt (1975). Para escoamento sobre morros baixos, sem separação, $h/L \ll 1$ e L/z_0 , a velocidade incremental do vento devido a presença do morro é determinada conforme segue equação 3: Esses autores representaram uma das maiores influências teóricas na consolidação do modelo para o escoamento do vento, sob as condições supramencionadas.

$$\Delta V(x,z) = d/L \sigma^*(x,z) \quad (L) \quad \text{equação 3}$$

Esta equação multiplicada por u_0 -velocidade referência a barlavento a uma altura de $z=L$, consolida a velocidade incremental total no ponto.

$$u_0(L) = u^*/k \ln (L/z_0)$$

Onde:

$\Delta V(x,z)$ – velocidade incremental do vento devido a altura do morro sobre a superfície local e a distância horizontal - x a partir do cume.

d - altura morro no cume;

L - comprimento característico do morro na direção do escoamento;

$\sigma^*(x,z)$ - forma do morro;

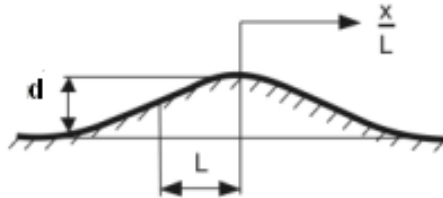
u^* - velocidade de fricção;

z_0 - comprimento de rugosidade;

k - constante de von Kármán;

Jackson e Hunt (1975) investigou a velocidade incremental do vento a partir da forma de um morro sinusoidal, $\sigma^*(x,z)$, bidimensional, conforme Figura 8.

Figura 8 – Modelo de Jackson e Hunt (1975) para um um morro sinusoidal.



A forma do morro sinusoidal identificada na equação 4 é substituída na equação 2 para o dimensionamento da velocidade incremental do vento para essa forma de acidente geográfico.

$$\sigma^*(x,z) = \frac{\left(1 + \frac{z}{L_s}\right)^2 - \left(\frac{x}{L_s}\right)^2}{\left[\left(1 + \frac{z}{L_s}\right)^2 + \left(\frac{x}{L_s}\right)^2\right]^2} \quad \text{equação 4}$$

No cume, quando $x=0$, a forma do morro atende a equação 5.

$$\sigma^*(z) = \frac{1}{\left(1 + \frac{z}{L_s}\right)^2} \quad \text{equação 5}$$

Sendo:

x - ponto considerado;

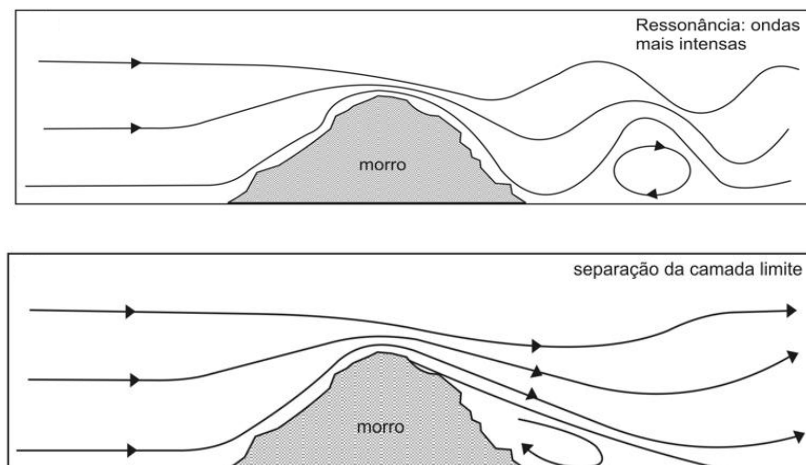
z - altura acima solo;

L_s - comprimento horizontal entre eixo vertical que passa no cume e a meia altura da elevação no sentido do vento.

As características do perfil da camada limite turbulenta em um escoamento sobre um morro isolado, caracterizado inicialmente Jackson e Hunt (1975) permanecem unânimes na literatura até a atualidade, quais sejam: uma leve redução na velocidade nos níveis mais inferiores

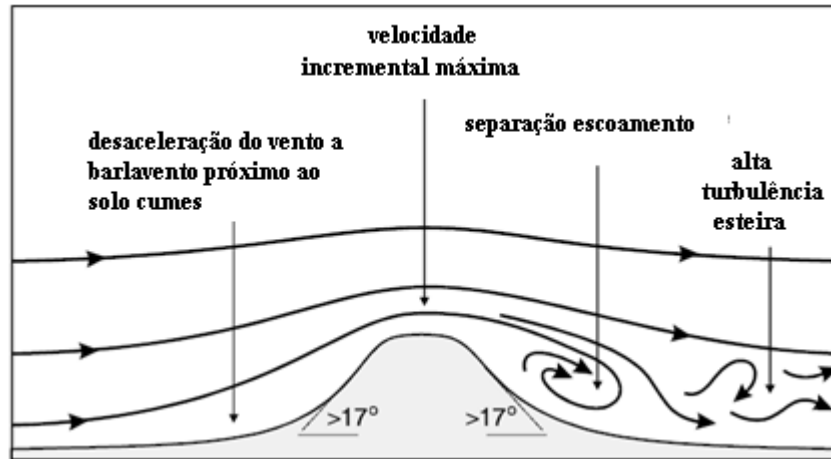
próximos ao solo, a barlavento, um aumento pronunciado na velocidade próxima ao cume, representado pela velocidade incremental do vento neste ponto e a formação de uma região de recirculação com o desprendimento de vórtices turbulentos, a sotavento da elevação. A elevação da superfície provocada pela presença de um morro, causa uma aproximação das linhas de corrente do escoamento, fenômeno esse denominado efeito Venturi, com um resultante aumento da velocidade e redução de pressão no cume da elevação. Conforme é observado na Figura 9, a sotavento do morro o processo se inverte e as linhas de corrente voltam a se afastar, resultando uma redução da velocidade e um aumento da pressão. A larga região de separação ou recirculação que se instala ao pé do morro depende das características do escoamento, da geometria do morro e da rugosidade da superfície (JACKSON; HUNT, 1975).

Figura 9 - Modelos de escoamento sobre um morro isolado (STULL, 1988, p. 602).



A formação de vórtices está relacionada à separação da camada limite próxima ao morro. Após esta sequência de eventos, o escoamento volta a se recompor a partir do recolamento à superfície. Para Cook (1985), o limite da inclinação para ocorrer a separação do escoamento é 17° , com geração de vórtices como função do aumento da inclinação. O exposto nas duas afirmações é mostrado na figura 10.

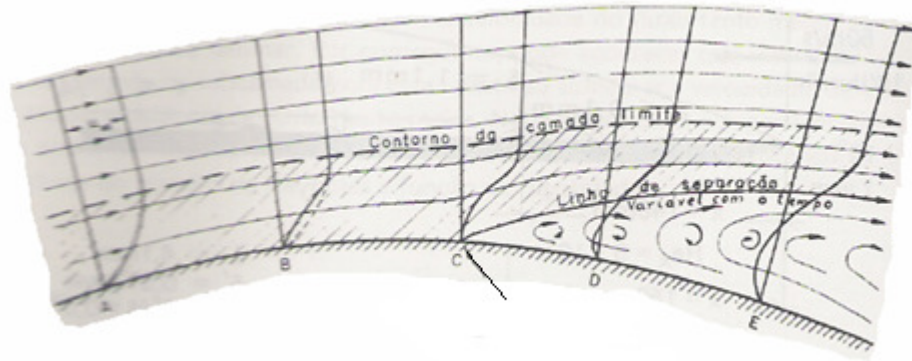
Figura 10 - Esquema representativo dos fenômenos da separação do escoamento, região de recirculação, turbulência e ponto de recolamento do escoamento.



O fenômeno da separação do escoamento é descrito conforme segue. De acordo com a redução da velocidade do fluido próximo à superfície, a quantidade de movimento será proporcionalmente menor, havendo uma distribuição de velocidades de acordo com a altura. Conforme Figura 11, na direção a sotavento esta desaceleração tende a crescer, adicionada pelo fato de a camada limite ir aumentando de espessura. No ponto C assinalado, da citada figura, a velocidade das partículas próximas a superfície se anula. A partir desse ponto o movimento junto à superfície muda de sentido, aumentando a espessura desta separação nos pontos D e E da Figura 11. O ponto onde se inicia a reversão do movimento e descolamento do fluido é designado por ponto de separação ou de deslocamento. O limite da camada mais próxima em relação a mais distante pode ser encontrado seguindo as linhas de corrente no qual o escoamento se divide no denominado de ponto de estagnação. (BLESSMANN, 1990).

No escoamento turbulento, uma parte de energia é transferida a outras camadas, ao que chamamos de turbulência. Esteira é o nome dado ao escoamento turbulento reverso, que se estabelece a sotavento de corpos rombudos, a partir dos quais o arrasto no corpo é exatamente análogo ao da esteira de um navio. A esteira turbulenta pode ser dividida em duas partes, a parte de recirculação do escoamento imediatamente atrás do corpo e a parte mais distante do mesmo. As duas situações são influenciadas pelo perfil de velocidades médias em algum grau. Os principais movimentos na esteira são mostrados na Figura 11, juntamente com o contorno da camada limite e a linha de separação do escoamento (BLESSMANN, 1990).

Figura 11 - Esquema representativo dos fenômenos da separação do escoamento, e esteira do vento (BLESSMANN, 1990).



Em 1988, a C.L.A. até então assumida como tendo seu escoamento verticalmente dividido em duas camadas - interna e externa - constantes no modelo proposto por Jackson e Hunt (1975), teve esta última subdividida em outras duas camadas na proposição do modelo de Hunt, Leivich e Richards (1988). Estes autores passaram a considerar a existência de uma região mediana ou camada intermediária. Em cada uma destas camadas, o escoamento é dominado por diferentes efeitos. Na camada externa, o escoamento é considerado como sendo sem atrito, mas com a influência de uma vorticidade média. Nessa camada, os esforços de corte são assumidos como negligenciáveis e o escoamento se comporta essencialmente sem atrito, sendo que a previsão dos efeitos da velocidade incremental do vento pode ser estimada por meio da solução linear para escoamentos (TEUNISSEN, 1983). A região externa é caracterizada pela redução da velocidade média horizontal e um aumento nas tensões de Reynolds, relativamente aos correspondentes valores encontrados em uma superfície plana. Nessa região, o escoamento é mais ou menos independente da superfície adjacente e prevalecem as deformações causadas pelos turbilhões²². O comprimento y/u é significativamente menor que a distância y da parede para o valor da razão “ $y u / v$ ” $\gg 1$. Além disto, “ y / δ ” é aproximadamente = 1. Na região interna, imediatamente adjacente à superfície, a topografia local e os efeitos da esteira são importantes. Nessa camada, o escoamento é logarítmico e existem significantes esforços de corte, conforme Schlichting (1968). Na camada intermediária identificada por ser uma região de significantes perturbações de pressão que decrescem com a altura, coexistem as características das camadas externa e interna, conforme equação 6.

²² Turbilhões: vento impetuoso que sopra redemoinhando gerando vórtices de tamanho elevado.

$$y u / \nu \gg 1 \text{ para } y / \delta \ll 1$$

equação 6

Onde:

y - distância da parede

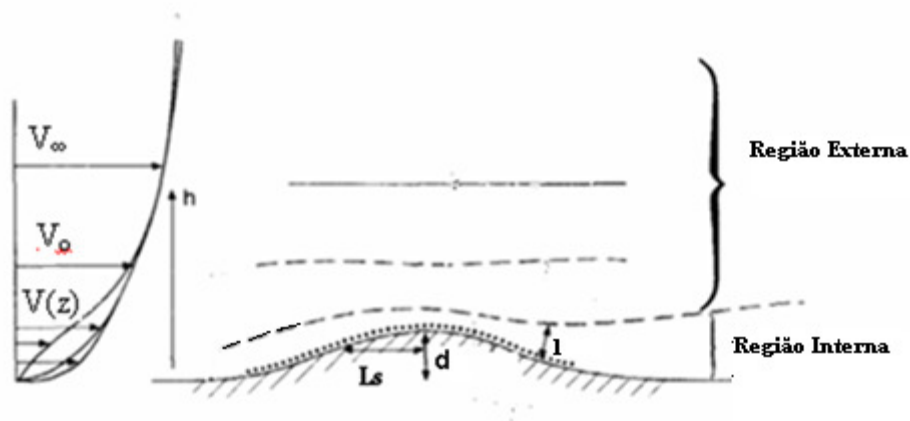
u - viscosidade

ν - viscosidade cinemática²³

δ - altura da camada limite

Na representação da Figura 12, verifica-se em uma altura média a camada intermediária, governada pela velocidade de referência - V_o . A mesma figura também mostra a faixa de perfis de velocidade a sotavento consideradas na análise de Hunt, Leibovich e Richards (1988), na qual $V_o(z)$ é diretamente proporcional às variáveis de entorno, V_o e V_∞ , para um escoamento não perturbado. A altura em que se V_∞ passa a ocorrer depende dos obstáculos e da rugosidade de entorno.

Figura 12 - Estratificação vertical de um escoamento sobre um morro baixo e isolado (HUNT; LEIBOVICH; RICHARDS, 1988).



Onde:

V_∞ - escoamento não perturbado;

V_o - velocidade de referência;

$V(z)$ - velocidade na altura z ;

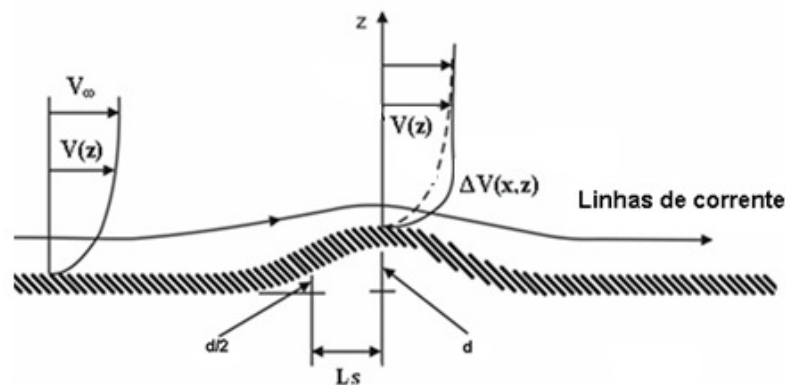
²³ Viscosidade cinemática- ν : em todos os fluidos nos quais as forças de fricção e inércia interagem é importante considerar a razão dentre a viscosidade μ e a densidade ρ .

L_s - distância horizontal a partir do cume ao ponto a barlavento onde a altura da elevação é $d/2$. Comprimento horizontal entre eixo vertical que passa no cume e a meia altura da elevação;

d - altura da elevação.

A incidência de um escoamento sobre um terreno plano - $V(z)$, na direção a barlavento de um morro isolado, determina um aumento na velocidade que frequentemente ocorre no topo da característica topográfica, denominado de velocidade incremental do vento próximo - ΔV . A velocidade sobre a topografia pode ser escrita como $V(x,z)=V_0(z) + \Delta V(x,z)$ conforme representação da Figura 13.

Figura 13 – Estratificação vertical de um escoamento sobre um morro baixo e isolado (Jackson e Hunt, 1975).



Onde:

$\Delta V(x,z)$ – velocidade incremental do vento.

Até Jackson e Hunt(1975), a maioria dos trabalhos teóricos sobre o escoamento do vento sobre morros estavam relacionados com os efeitos da estratificação e com os efeitos do perfil da velocidade do vento incidente no morro, ou seja, a ênfase não era a variação do escoamento do vento em decorrência da altura da elevação. Esses autores desenvolveram uma teoria analítica simples para o escoamento de uma camada limite turbulenta adiabática sobre uma superfície uniformemente rugosa de uma baixa montanha. Esta teoria foi capaz de prever as características gerais do efeito de um pequeno morro sobre a camada limite turbulenta e demonstrar a influencia da troca de parametros físicos na determinação do escoamento.

Jackson e Hunt (1975) demonstraram que os aumentos importantes nos esforços tangenciais, em um morro baixo e isolado, com rugosidade uniforme e curvatura suave, sob o enfoque bidimensional, ocorrem apenas na fina camada limite adjacente à superfície. São convergentes à tese, Melbourne (1983) e Teunissen (1983), quando afirmam que a Teoria de Jackson e Hunt (1975), aplica-se, principalmente, à camada limite externa.

A teoria linear foi extensivamente aplicada nas décadas de 70 e 80. Modelos dela derivados têm influência até o presente, para a elucidação do escoamento na região ascendente do morro e no cume do mesmo. De acordo com Corbett (2007), esta teoria se ressent de duas grandes limitações:

- a) Sua validade é formalmente limitada a morros baixos com pequenas inclinações;
- b) Todos os modelos lineares não são validados em quadros mais complexos que envolvem componentes verticais do escoamento.

Velocidade incremental é acréscimo que se soma ao perfil do vento, em decorrência dos efeitos da topografia no escoamento, que ocorre principalmente no cume do morro, mas também, em menor valor na altura média, a barlavento desse.

Além do exposto, Sabatino et al. (1998), afirmam que a velocidade incremental do vento - ΔV deve ser entendida como o resultado da superposição linear dos efeitos topográficos e da rugosidade. Desse modo, pode-se escrever de acordo com equação 7.

$$\Delta V = \Delta V_h + \Delta V_r \quad \text{equação 7}$$

Onde:

ΔV_h - velocidade incremental do vento, devido topografia;

ΔV_r - velocidade incremental do vento, devido a rugosidade.

Esta hipótese é correta se aplicada a morros com pequena declividade (até 0,4), onde não ocorre separação e o escoamento muda com a rugosidade da superfície. Por exemplo, extensões de água ou relva, grama em áreas com diferentes rugosidades, quando a razão entre as duas rugosidades correspondentes $z_{o2}/z_{o1} \leq 10^2$ (SABATINO et al.,1998).

Miller e Davenport (1988) em sua pesquisa acerca da velocidade incremental entenderam que o efeito deste acréscimo de velocidade pode ser quantificado pela razão de velocidade incremental, o qual é definido como a fração de troca na velocidade pela aproximação

Considerando a velocidade no cume de um morro de altura e a velocidade de referência a barlavento deste sobre o terreno local divididas pela primeira, a razão incremental pode ser escrita como a velocidade incremental no cume do morro sobre a velocidade neste ponto, nos termos da equação 8.

$$\Delta S = \frac{V(z) - V_o(z)}{V_o(z)} = \frac{\Delta V(z, z)}{V_o(z)} \quad \text{equação 8}$$

Onde:

V_∞ - escoamento não perturbado;

ΔS - razão de velocidade incremental e

ΔV - velocidade incremental do vento

$V(z)$ - velocidade do vento na altura z acima da superfície do morro

$V_o(z)$ - velocidade de referência a barlavento do morro na mesma altura desse sobre o terreno local;

L_s - extensão horizontal do eixo até meia altura do morro;

L - extensão horizontal do eixo ao final do morro.

d - altura do morro;

$d/2$ - meia altura do morro.

No mesmo documento atestam que a consideração de qualquer topografia real mostra logo que este caso é altamente idealizado. Em geral muito poucas características topográficas são simétricas e talvez, ainda mais importante, elas são usualmente envolvidas por outras características topográficas que afetam o escoamento. Além disso, a relação não atesta o efeito da topografia a barlavento. Para o equacionamento, consideraram resultados em túnel de vento sobre um número de superfícies complexas bi-dimensionais de modo a desenvolver as linhas mestras a serem seguidas para o cálculo da velocidade incremental do vento em terrenos complexos.

Miller e Davenport (1998) consideraram três diferentes superfícies. As amostras representaram modelos em escala de terreno real, com a mesma rugosidade - z_o e com a

velocidade gradiente da ordem de 10,2 m/s. Estes referenciais ofereceram resultados idênticos, em cada tipo testado, tais como:

- a) a velocidade incremental do vento que ocorre em terrenos complexos é reduzida quando comparada com aquela encontrada em um morro ou vale isolado;
- b) a aplicação de orientações básicas usadas em vários padrões para potenciais eólicos localizados em terreno complexos leva a resultados conservadores para fins de projeto, tais como o valor da velocidade incremental do vento que é superestimada;
- c) são encontrados aumentos significantes nos níveis de turbulência em uma superfície complexa, em relação àqueles encontrados para uma superfície plana.

Miller (1995), em sua análise do aumento da velocidade de ondas sinusoidais em terrenos complexos e simétricos, verificou que acima do nono e décimo cume, tanto em lisas como rugosas superfícies, a velocidade incremental do vento sobre a região externa da camada limite chega a ter valores negativos. Para o autor, isto é causado pelo aumento da força de arrasto na superfície da onda adjacente, a qual origina um aumento na espessura da camada limite, ocasionando uma aparente redução na velocidade, quando esta é comparada à velocidade de referência a barlavento, na mesma altura.

De acordo com Meroney (1990), exceto para declividades muito pequenas (de 1 a 10%), a velocidade incremental do vento - ΔV é proporcional a altura.

Rokenes (2009) diz que a velocidade incremental é tipicamente mais alta perto do solo próximo ao cume e decresce com a altura e distância da crista.

De acordo com Arya(1988) as maiores velocidades incrementais são observadas sobre cumes de morros tri-dimensionais, com moderadas declividades.

No que se refere aos limites da influência dos efeitos topográficos e a aplicação dos modelos lineares para explicar os fenômenos físicos, Miller (1995) atesta que estes podem ser validados até declividades máximas de terreno em torno de 0,1. Entretanto, a comparação de um número de perfis de velocidade, medidos experimentalmente, com aqueles calculados a partir do emprego de modelos lineares, mostrou que embora o limite supracitado permaneça válido, os valores numéricos são ainda consistentes com os valores experimentais até a faixa de declividade de até 40%. Para declividades maiores, os modelos lineares superdimensionam a velocidade incremental do vento. Xu e Taylor (1995) têm mostrado que para terrenos com

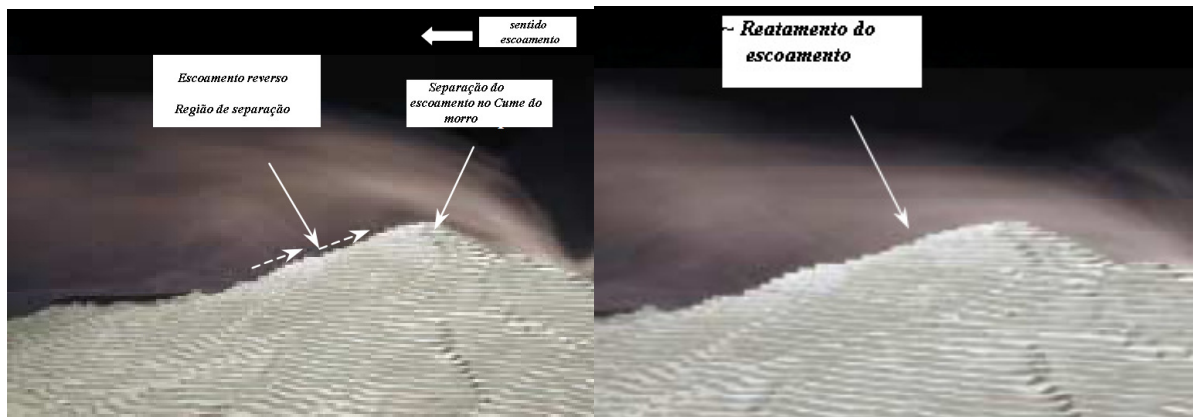
declividades na faixa de até 30%, inclinação média de, aproximadamente, 17°, os modelos lineares e não lineares oferecem resultados similares para o cálculo da força de arrasto.

De acordo com Ngo e Letchford (2008), a região da esteira, localizada ao pé do morro, a sotavento, diferencia-se pela ocorrência de uma redução na velocidade do vento médio e significativo aumento nos níveis de turbulência, relativamente a um perfil típico de um terreno plano. Esta constatação é convergente com a de Palma et al. (2008), quando estes afirmam que sob condições normais, a turbulência é reduzida com a proximidade do cume do morro e que baixas turbulências andam juntas com altas velocidades do vento. Nesta mesma tese, a distorção do escoamento em uma área complexa pode reduzir a intensidade da turbulência (BURTON et al., 2001). Miller (1995) atesta que no topo do morro ($z/d=1$), ocorre a separação do escoamento, o início da formação da instabilidade com turbulência, o desprendimento de vórtices e a consequente recirculação do escoamento, a sotavento do morro, sendo que a variação máxima na velocidade lateral ocorre na altura $z/d = 0,125$, a barlavento da elevação. A sotavento do morro, as características do vento são grandemente indefinidas, não sendo precisos os limites superior e inferior da distância destas ocorrências em relação à superfície.

De todo modo, Arya (1988) atesta que a região de recirculação é proporcional a altura do acidente topográfico, estimando que a esteira turbulenta seja da ordem de "9 d", sendo "d" altura do morro.

Deixando a alteração orográfica de ter influência no escoamento, a sotavento da mesma, o escoamento tende a assumir a conformação de uma camada limite padrão, dominada unicamente pela rugosidade da superfície. Na Figura 14, pode ser observado o fenômeno multifacetado da separação e recolamento do escoamento sobre um terreno complexo. Esta figura mostra a visualização de um escoamento, em um modelo de escala, em um túnel de vento. A separação do escoamento ocorre em vários pontos, dentro de uma extensão, tanto no sentido do escoamento ascendente como no descendente, dependendo da geometria do terreno e da turbulência existente no local. O recolamento do escoamento ocorre em algum ponto, a sotavento do cume, de maneira transitória e irregular, como é o caráter do escoamento turbulento, em geral. Pode-se afirmar que declividade da característica topográfica em torno de 0,4, já se constitui suficientemente íngreme de modo a causar a separação do escoamento do vento (DERICKSON et al., 2004). Para Meroney (1990), a separação do escoamento no cume do morro é função de ambas as inclinações, tanto , a barlavento, quanto a sotavento.

Figura 14 - Diagramação do fenômeno da separação e recolamento de um escoamento em um modelo em escala em túnel de vento.



A forma do morro também influencia a magnitude e o perfil da velocidade do vento imediatamente adjacente ao solo (NEFF e MERONEY, 1998).

Por outro lado, Finardi, Morselli e Jeannet (1987) acrescentam que as maiores características do escoamento sobre um morro são determinadas pela forma, tamanho e estabilidade atmosférica do local e a intensidade da turbulência é função do tipo e altura da vegetação a barlavento do morro.

Neff e Meroney (1998) mediram os efeitos da forma do morro e da densidade de vegetação sobre e no entorno deste em um escoamento, bem como os efeitos da turbulência no cume da elevação, através de uma série de medições tomadas em um túnel de vento. Para tanto, empregaram como modelo de ensaio um morro bidimensional, com testagens para cumes triangulares e sinusoidais de inclinações 1:2, 1:3, 1:5 e 1:10, conforme Figura 15. Além, destas variáveis, consideraram diferentes percentuais de área coberta por vegetação (sem cortes no cume, com corte no topo do cume, com todo morro sem vegetação e com todo morro mais o pé deste, sem vegetação), conforme Figura 16.

Figura 15 - Modelos de perfis de seção transversal de cumes (NEFF; MERONEY, 1998).

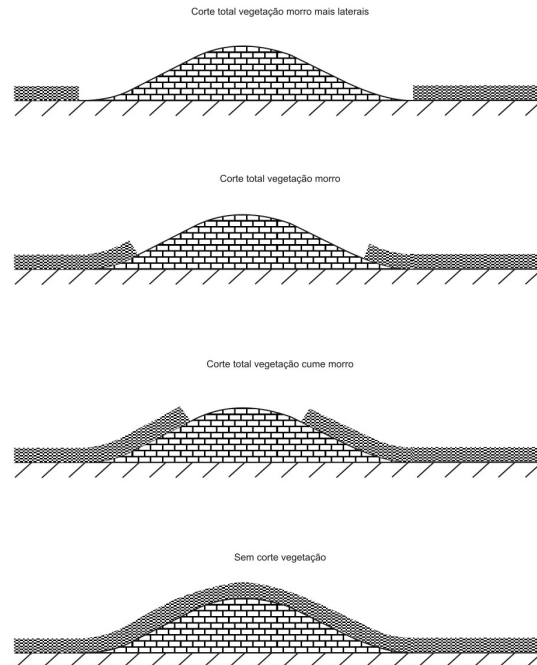
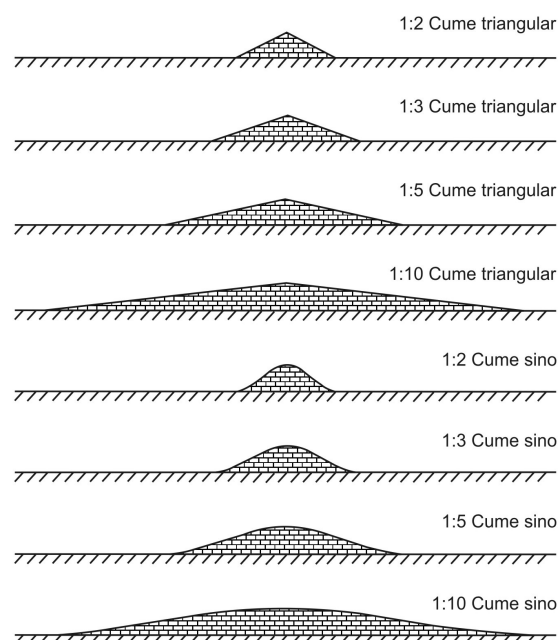
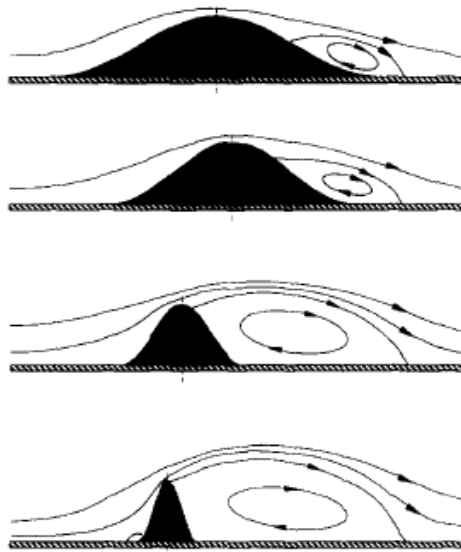


Figura 16 - Modelos de cortes em cumes sinusoidais com declividade 1:3 (NEFF; MERONEY, 1998).



A Figura 17 mostra um escoamento turbulento com número de Reynolds, $Re = 8 \times 10^4$ para diferentes extensões horizontais de um morro, com as proporcionais regiões de recirculação.

Figura 17 - Visualização de um escoamento para diferentes perfis de seção transversal de um morro isolado com número de Reynolds - $Re = 8 \times 10^4$ e as correspondentes regiões de recirculação (NEFF; MERONEY, 1998).



.Neff e Meroney (1998) avaliaram os percentuais de obstrução do vento gerados pela presença de morros e/ou vegetações em termos de perfis de velocidades normalizadas, velocidade incremental do vento e reduções percentuais de energia gerada. Citam-se como principais conclusões desta pesquisa:

- a) o efeito da vegetação é geralmente limitado à região imediatamente acima do solo, exceto quando sua presença ou ausência induz a separação do escoamento;
- b) a velocidade vento próximo ao solo aumenta substancialmente até para pequenas áreas de corte na vegetação. Sobre morros mais íngremes, os cortes na vegetação podem oferecer apenas melhoras marginais no aumento do potencial eólico localizado, e, em consequência na geração de energia eólioeletrica.

Finardi, Morselli e Jeannet (1987) concordam com o exposto quando dizem que as características geométricas do morro e inclinação do mesmo são os fatores determinantes para o tamanho, intensidade da esteira. Esses autores dizem que o escoamento em ângulo oblíquo

em relação a normal, em cume agudo, ou seja com a altura pelo menos o dobro da largura, determina a geração de um rastro de vórtices e um escoamento turbulento do tipo redemoinho.

Para Meroney (1990), morros de diferentes formas, mas com inclinações equivalentes, produzem perfis similares, quando não existe separação do escoamento.

Ishirara, Hibi e Oikawa (1999), pesquisou o escoamento turbulento em um morro de declividade 32° em um modelo em escala de madeira com a forma $z_s(x,y)$ com inclinação de 32° com $d=40$ mm e $L=100$ mm, sendo "d" = altura do morro e "L" = extensão do morro. Empregou sondas *split-fiber* para medições da velocidade e turbulência. A camada limite neutramente estratificada foi simulada empregando elementos de rugosidade no piso da seção de ensaio. Para tanto empregou um modelo em escala com a forma $z_s(x,y)$ definida pela equação 9.

$$z_s(x, y) = d \cos^2(\pi(x^2 + y^2)^{1/2} / 2L) \quad \text{equação 9}$$

Onde:

z' - segunda coordenada vertical. Usada para identificar a altura acima da superfície do morro. Admite-se que $z' = z - z_s(x, y)$;

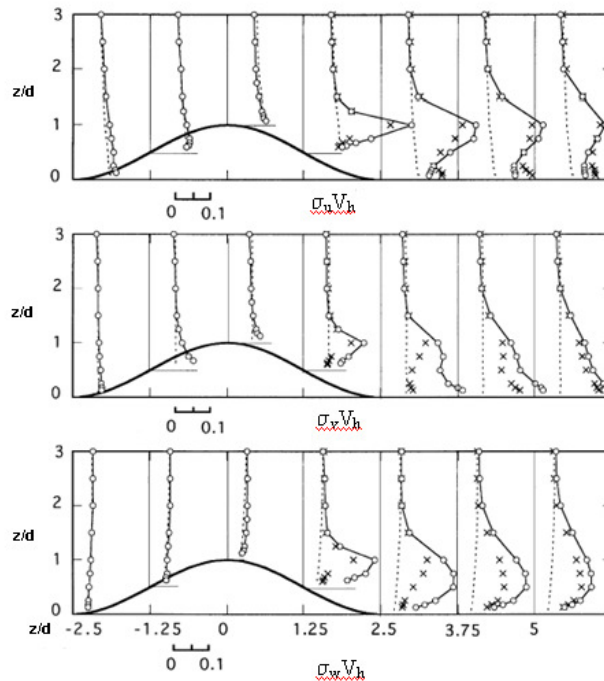
$z_s(x, y)$ - forma do morro;

O autor verificou que a velocidade incremental do vento não ocorre apenas no cume do morro e que chega ao valor de 1,5 na altura $z/h = 0,125$. Os valores obtidos por Ishirara, Hibi e Oikawa (1999) concordam com o experimento de Mason e King que encontrou para as mesmas situação o valor de 1,6 para a velocidade incremental do vento a $z/h = 0,13$.

A forma do perfil vertical de velocidade do vento proposto por Ishirara, Hibi e Oikawa (1999) é também similar a Arya e Gadiyaram (1986). À meia altura do morro, no sentido do vento, existe um decréscimo na velocidade em níveis baixos e uma velocidade incremental do vento em níveis mais altos. Do outro lado do morro, pode ser notado um pronunciado aumento na velocidade na inclinação média, o qual decresce mais rapidamente com a altura que aquela acima do cume. Os perfis típicos de velocidade do vento sobre um morro isolado, representados na Figura 18, retratam os citados fenômenos: a redução na velocidade a barlavento, ao pé do morro, devido ao gradiente adverso de pressão, o surgimento da velocidade incremental do vento após a elevação, no cume da mesma. As perturbações

máximas nas variações da velocidade longitudinal e vertical foram observadas na altura do morro ($z/h = 1$) correspondendo a separação do escoamento ao pé do morro, a sotavento.

Figura 18 – Perfis verticais de velocidades do vento em uma colina baixa e isolada. σ_u/V_h , σ_v/V_h e σ_w/V_h com apreciação da velocidade incremental do vento (ISHIRARA; HIBI; OIKAWA, 1999).



Arya (1988) afirma que os efeitos da estratificação no escoamento ao redor da topografia são geralmente descritos em termos do número de Froude ²⁴, baseado na altura característica ou escala de comprimento da característica topográfica na direção do escoamento. Atende as equações 10 e 11.

$$Fl = V_k/N_d \quad \text{equação 10}$$

$$Fl = V_k/NL^* \quad \text{equação 11}$$

Onde:

Fl - Número de Froude;

V_k - velocidade característica de aproximação do escoamento;

²⁴ Número de Froude - O número de Froude é um número adimensional que representa a razão entre as forças de inércia e as forças de gravidade. O número de Froude separa os escoamentos supercríticos dos subcríticos, e seu valor, no regime crítico, é 1.

- Escoamento supercrítico: o número de Froude é maior do que 1.
- Escoamento subcrítico: o número de Froude é menor do que 1.

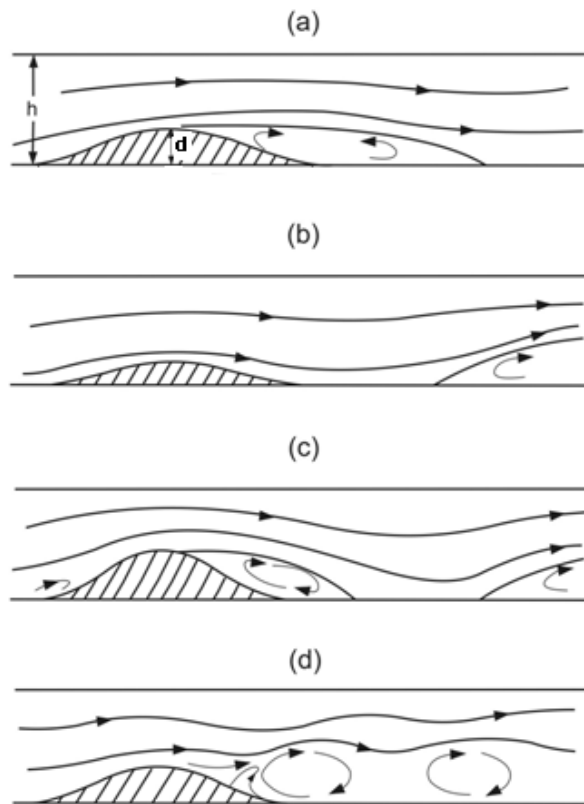
N - frequência Brunt-Vaisala²⁵;
 d - altura da característica topográfica;
 L*₁- escala de comprimento.

Na representação da Figura 19, o número crítico de Froude (F_c) para separação representa o valor mais alto de F, no qual a camada limite de separação é suprimida pela esteira a sotavento. O número de Froude depende da estratificação do escoamento de aproximação, bem como de vários parâmetros do morro (altura, relação altura/largura e forma). Se $F \ll 1$ a estratificação é forte, enquanto $F \gg 1$ é proximamente neutra, sendo que $F = \infty$ traduz uma estabilidade estritamente neutra. O número de Froude também estipula critérios para geração da esteira e separação do escoamento a sotavento do morro. Os critérios para o número de Froude foram desenvolvidos considerando um escoamento uniforme sem atrito com densidade ou gradiente de temperatura potencial constante (HUNT; LEIBOVICH; RICHARDS, 1988).

A Figura 19 indica os diferentes padrões de escoamento, que podem se desenvolver a sotavento de um morro, dependendo do número de Froude e da inclinação máxima da elevação. (a) Região supercrítica, $F > F_c$, onde a separação ainda é controlada; (b) Morro com baixa inclinação subcrítica, $F < F_c$, onde a separação é causada pela esteira a sotavento; (c) Morro com moderada inclinação, supercrítica, $F > F_c$, identificação da região de separação da camada limite a sotavento da inclinação do morro; (d) Morro com inclinação moderada, subcrítico, $F < F_c$, onde a esteira a sotavento induz à separação no mesmo ponto (ARYA, 1988). Ainda, segundo o referido autor, encontram-se tipos de escoamentos similares e outros fenômenos que ocorrem a sotavento de morros tridimensionais, sob diferentes condições do escoamento de aproximação. Cita ainda, como um fenômeno de escoamento relatado para topografia, os severos ventos, que se desenvolvem ladeiras abaixo, denominados localmente de Chinook, Föhn ou Bora, seguidos pelo salto hidráulico. Essas são análogas a passagem da água.

²⁵ Frequência de Brunt-Vaisala é a frequência natural da gravidade na estratosfera (WRASSE et al., 2006).

Figura 19 - Modelos de escoamentos bidimensionais sobre morros isolados com diferentes alturas, segundo Arya (1988).



A Figura 20 mostra o esquema de dois padrões de escoamento com baixa e alta velocidade encontrados em um escoamento de camada mista. Nesse caso, o número de Froude que determina o escoamento sobre o morro é determinado por $V_k/N(h-d)$.

Um importante aspecto do escoamento estratificado estável sobre e ao redor de características topográficas tridimensionais é a tendência de parcelas de fluido se deslocarem preferencialmente ao redor do que sobre a topografia, com estratificação crescente (n° de Froude decrescente). Esse fato ocorre porque tais parcelas de fluido não possuem energia cinética suficiente para a conversão em energia potencial necessária para se elevar através de um gradiente de densidade forte e estável (ARYA, 1988).

A Figura 20, detalha modelos de escoamento:

a) baixa velocidade do vento com $V_k/N(h-d) \ll 1$, separação do escoamento na inclinação a sotavento e;

b) alta velocidade do vento com $V_k/N(h-d) \approx 1$, sem separação do escoamento no pé da inclinação a sotavento do morro, considerando-se para as equações acima os termos que seguem.

Onde:

V_k - é a velocidade característica de aproximação do escoamento;

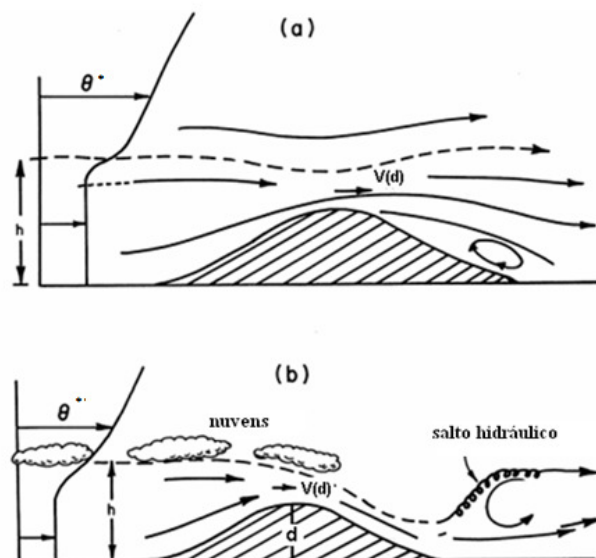
N - frequência Brunt-Vaisala;

h - espessura da camada limite;

d - altura da característica topográfica e

θ - flutuação potencial da temperatura.

Figura 20 - Esquema do escoamento sobre cume bi-dimensional com uma elevada inversão a barlavento (HUNT e SIMPSON, 1982).



No que se refere a terrenos complexos, o aproveitamento desses locais para instalações de energia eólica em morros valem-se da velocidade incremental do vento para o aumento do potencial eólico das mesmas.

3.2.2.2 Taludes

Denominam-se taludes as estruturas geomorfológicas que envolvem elevações com formas diferenciadas, caracterizadas por inclinações acentuadas. Oferecem possibilidades para vários centros de interesse, entre elas, a instalações eólicas.

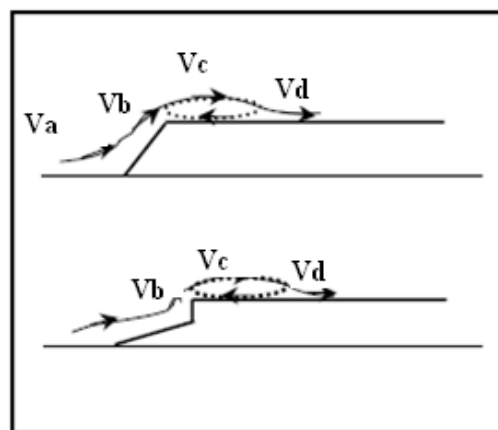
Com o escoamento acima da face de um talude raso com inclinação $< 17^\circ$ em relação à superfície, conforme Figura 21, a velocidade do vento próxima à superfície primeiramente

sofre uma desaceleração a partir de um valor de aproximação - V_a para um valor mínimo - V_b (ao pé do talude). A seguir o escoamento é acelerado ao máximo - V_c (próximo da crista) antes de desacelerar novamente para um valor constante - V_d , a sotavento. A velocidade incremental máxima na crista V_c/V_a é proporcional à inclinação do vento no talude, alcançando 1,6 para $z = 10\text{m}$ para uma declividade de 30% de base rugosa. Quando o escoamento de aproximação é inclinado para o talude, a componente paralela ao talude permanece, enquanto a componente normal muda como o descrito ocasionando mudanças locais na direção do vento de aproximadamente 15%.

Consoante Derickson et al. (2004), instalações nas proximidades extremas a um talude íngreme, apresentam condições indesejáveis para aproveitamento do vento, posto que a passagem do escoamento pelas bordas íngremes dessa conformação topográfica, determina a ocorrência da separação do escoamento, a partir dos ângulos dessa, com o consequente surgimento da turbulência. Por outro lado, taludes com baixas inclinações produzem pouca ou nenhuma separação do escoamento, podendo constituir-se em excelentes áreas para aproveitamentos eólicos.

De acordo com Derickson et al. (2004), o comportamento exato do escoamento é função crítica do tipo da elevação ou das características desta, não sendo possível generalizar a resposta às mesmas. Os referidos autores, na Figura 21, exemplificam as formas mais comuns da ocorrência da separação de um escoamento, conforme os dois tipos de seção transversal de taludes íngremes mostrados.

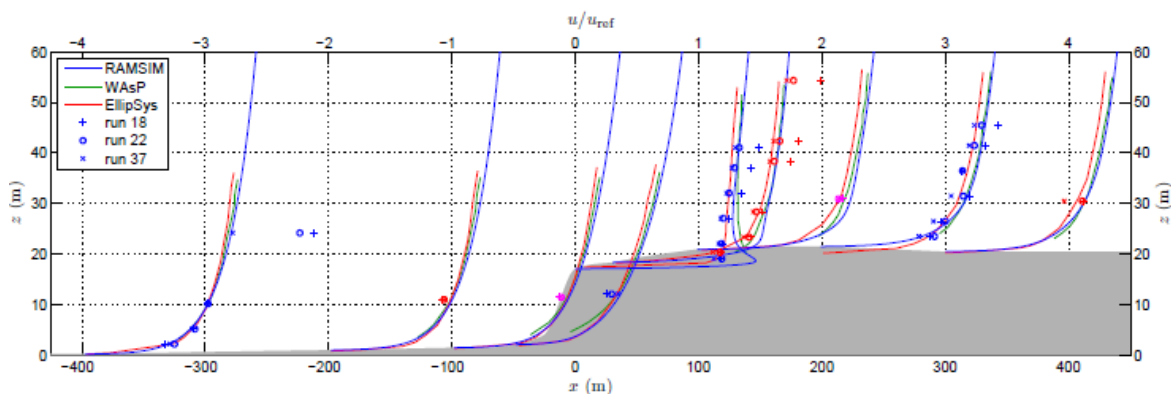
Figura 21- Modelagem de separação e recolamento do escoamento em dois tipos de taludes íngremes (DERICKSON et al., 2004).



A intensidade da turbulência depende da altura e separação do escoamento a sotavento do talude e seu ponto máximo ocorre em medições a altura $z = -100$ m acima do solo, podendo atingir valores adicionais de 100%.

Corbett (2007) investigou o talude de Hjordemal, uma elevação com inclinação de 30° . Para tanto, empregou três ferramentas: o programa RAMSIM²⁶, uma campanha de medições de superfície, composta por onze mastros dotados de anemômetros sônicos, medidores de direção e sensores de temperatura instalados entre 2 e 30 m acima do nível do solo, o programa WASP e resultados EllipSys²⁷. Em uma região uniforme, com " z_0 " da ordem de 0,06 e com a adoção da lei logarítmica, identificou a influência da orografia sobre a construção da C.L.A., por meio da construção de perfis de velocidade vertical do vento, os quais passam a ser comparados na Figura 22 em um escoamento no sentido ascendente do morro. Os perfis são construídos conforme o eixo horizontal " x " para as alturas " z ". Para os valores de x de -400 a 100 verifica-se a construção de perfis dos perfis de vento de acordo com terrenos planos. Para $x = 100$ m identifica-se a velocidade incremental do vento, ponto de melhor instalação de aerogeradores para a característica topográfica analisada.

Figura 22 - Perfis da velocidade do vento em um escoamento ascendente sobre um talude (CORBETT, 2007).



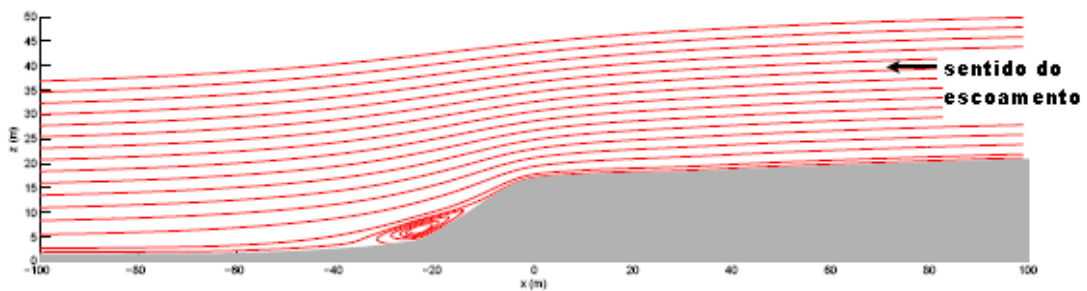
²⁶ RAMSIM: o RisØ Atmospheric Mixed Spectral – Integration Model (RAMSIM) – é um modelo computacional de escoamento linear desenvolvido para calcular, entre outros parâmetros, a velocidade média do escoamento sobre um terreno de orografia complexa

²⁷ EllipSys: EllipSys2D. Este código desenvolvido pelo RisØ Laboratório. Ele é projetado para resolver numericamente as equações bidimensionais de Navier-Stokes para um fluido incompressível. Emprega uma grade de células para o campo de pressão e as componentes cartesianas da velocidade. As equações são discretizadas por meio de uma formulação de volumes finitos. Um algoritmo SIMPLE é usado para resolver as equações de movimento e de pressão.

A Figura 22 exibe os perfis de estratificação do vento sobre um talude e confirma, no cume do morro, o fenômeno da velocidade incremental do vento.

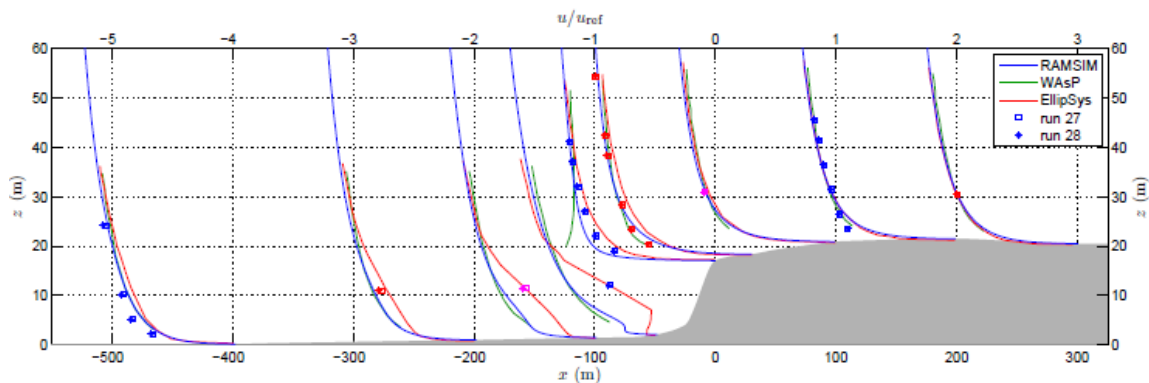
Em caso reverso, ou seja, o vento no sentido descendente ao talude, o escoamento substancialmente se descola da superfície, a partir da maior altura do mesmo. A zona de recirculação mostrada na Figura 23 foi, neste caso, da ordem de 4 m de profundidade com 20 m de largura.

Figura 23 - Linhas de corrente de um escoamento no sentido descendente em um talude (CORBETT,2007)



Os perfis da velocidade de vento de Corbett (2007) para o sentido descendente de um talude são mostrados na Figura 24, com a leitura semelhante à da Figura 22.

Figura 24 - Perfis da velocidade do vento em um escoamento descendente sobre um talude (CORBETT, 2007).

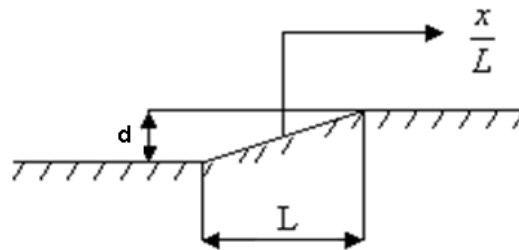


À distância de $x = -50$ m, no eixo horizontal, da Figura 21 identifica-se o início da região de recirculação. Pode-se afirmar que esses locais apresentam uma configuração de perfil de

velocidade de vento inadequada à instalação de aerogeradores, dado que se pode observar uma redução significativa da velocidade do vento e um aumento da turbulência.

Jackson e Hunt (1975) investigaram a velocidade incremental do vento em um talude. Para tanto, empregaram as equações 12 e 13 e a simbologia gráfica da Figura 25, para a definição da forma da característica topográfica $\sigma^*(x,y)$ para o cálculo da velocidade incremental do vento, conforme equação 3.

Figura 25 - Simbologia das equações de Bowen (1983) para o caso de taludes.



$$\sigma^*(x, z) = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{\left(\frac{x}{L} + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{z}{L} \right)^2}{\left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{z}{L} \right)^2} \right] \quad \text{equação 12}$$

Sendo:

$\sigma^*(x, z)$ - forma da característica topográfica tomada bidimensionalmente;

x - declive;

z - altura acima solo;

L - comprimento horizontal do declive.

Acima do cume, onde $x = \frac{1}{2}$

$$\sigma^*(x, z) = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{1 + \left(\frac{z}{L}\right)^2}{\left(\frac{z}{L}\right)^2} \right] \quad \text{equação 13}$$

$\sigma^*(x, z)$ = forma da característica topográfica tomada bidimensionalmente;. Varia com a altura e posição horizontal relativa ao cume. Não depende da inclinação do mesmo.

3.2.3 Escoamento em Terrenos Complexos

Características topográficas complexas são consideradas aquelas paisagens onde a não homogeneidade e rugosidade agregam-se, simultaneamente. Tal ocorre, principalmente, devido à troca de vegetação, como função da altura ou sazonalidade. Morros, cumes, taludes e vales são considerados características geralmente presentes nesses cenários. Morros diferem-se de cumes nos quais o vento pode divergir sobre os lados, além do aparecimento da velocidade incremental do vento no cume do morro.

O vento, em geral, aumenta sua velocidade com a altura, entretanto, em terrenos complexos, este aumento ocorre não apenas devido à força de arrasto na camada limite (considerando que a atmosfera dentro 1.000 m acima do solo é representada pela função logarítmica), mas também devido ao ângulo que a elevação ou reentrância faz com o nível do solo, tais como morros, vales (JONH et al., 2009). Em geral, o vento aumenta sua velocidade quando ele se move para cima da inclinação do morro ou do cume e sobre o mesmo determina o aparecimento da velocidade incremental do vento.

Ainda segundo Miller e Davenport (1998), em um escoamento sobre terrenos complexos é feito uso das mesmas relações empregadas para dimensionar escoamentos sobre terrenos planos. Para efeito da transferência da quantidade de movimento sobre terrenos planos e horizontalmente homogêneos, a natureza do terreno subjacente é caracterizada pelo comprimento de rugosidade " z_0 ", o qual pode ser obtido a partir do perfil logarítmico de velocidade. A transferência da quantidade de movimento sobre terreno plano, horizontal para a superfície adjacente, requer que duas condições sejam satisfeitas:

a) a altura dos elementos de rugosidade típicos deve ser tal que exista uma região onde as alturas sejam simultaneamente muito maiores que aquelas dos elementos de rugosidade e muito menores que a espessura da camada limite;

b) a camada limite deve estar em equilíbrio local. O citado autor atesta que a camada limite está em equilíbrio em alturas muito próximas à superfície.

Por outro lado, os mesmos autores mencionam publicações que empregam justificativas para o uso de um comprimento de rugosidade empírico para terrenos complexos. Estes trabalhos incluem pesquisas de laboratório de escoamentos sobre ondas sinusoidais simétricas (BUCKES; HARATY; ADRIAN, 1984), simulações numéricas do escoamento sobre morros similares sequenciais com idêntico espaçamento (WOOD e MASON, 1993) e estudos de campo de Grant e Mason (1990), Hignett e Hopwood (1994).

Miller (1995) relata que para terrenos altos apenas uma pequena fração da altura do terreno subjacente acima da superfície apresenta comportamento logarítmico com boa aproximação, sendo que na maioria das situações consideradas, a avaliação do comprimento de rugosidade estimado para terrenos complexos foi muito maior que o comprimento de rugosidade local. Além disso, o terreno adjacente forma uma fração substancial para a composição da profundidade da camada limite típica em terrenos altos. Esta afirmação prova que os pressupostos do emprego da metodologia usada em terrenos planos e horizontalmente homogêneos não se confirmam em terrenos complexos.

Segundo Miller (1995), alguns estudos têm adotado a relação empírica de Lettau (1969), na qual o comprimento de rugosidade efetivo é dado em conformidade com a equação 14.

$$\frac{z_{\text{of}}}{d_*} = C \frac{A}{S_d} \quad \text{equação 14}$$

Onde:

z_{of} - comprimento de rugosidade efetivo;

d_* - altura do elemento de rugosidade;

A - área frontal dos elementos de rugosidade em uma área horizontal S_d ;

C - constante que depende da forma dos elementos de rugosidade. Lettau recomenda = 0,5;

S_d - área horizontal.

Segundo Miller (1995), é importante assinalar que a fórmula de Lettau estima a contribuição devido ao arrasto dos elementos de rugosidade, entretanto, não considera a interferência advinda de características de pequena escala e da cobertura da superfície local.

A Tabela 3 apresenta uma relação de valores de comprimento de rugosidade efetivo segundo vários autores correlacionada com a altura da edificação.

Tabela 3 - Comparação entre as configurações dos elementos de rugosidade empregados em vários estudos.

Autor	α	Tamanho do elemento de rugosidade (LxBxk)mm	λ (%)	λ_f (%) = A_f/A_p	d (mm)	z_o (mm)	z_o/k	Z_o/H	μ^*/U_δ	f/δ
Yee-Tak Ng	0,27	50,8x101,6x101,6	4,2	8,47	-	2,12	0,021	1,95	0,055	-
Counihan	0,28	15,9x15,9x9,5	15	9,96	1,6	0,75	0,078	5,00	0,055	4,5
Robins	0,20	20x20x20	25	12,90	20	4,40	-	2,20	0,065	10
Lee	0,28	75x75x37,5	33,3	16,7	10	3,00	0,083	3,33	-	5,1
Reinhold et al.	0,28	102x102x102	11,37	11,37	-	-	-	-	0,061	6,1
Atkins and Cermak	0,26	25x25x25	11,11	11,11	-	2,79	0,12	2,2	0,052	11,5
Farell	0,28	28x28x28	7,84	7,84	7	2,40	0,086	2,0	0,057	10,0

Fonte: (FARELL, 1999)

Onde:

α - expoente da lei potência;

λ - densidade de área plana;

λ_f - área frontal por unidade de área plana;

A_f - área frontal;

A_p - área plana;

d - deslocamento plano-zero;

z_o - comprimento rugosidade;

k - altura do elemento de rugosidade;

H^* - altura da agulha;

L - dimensão do elemento de rugosidade na direção do escoamento;

B - dimensão do elemento de rugosidade na direção y ;

u_* - velocidade de atrito ou fricção;

U_0 - velocidade de escoamento livre;

f - extensão horizontal percorrida pelo vento –*fetch*;

δ - altura da camada limite.

As pesquisas de Derickson et al. (2004), através de medições efetuadas na região de recirculação ou esteira, indicam que neste local o mesmo é reverso próximo à superfície, atestando o fenômeno.

3.2.3.1 Escoamento em Vales

Segundo Rotach et al. (2008), a curvatura do vale é o elemento chave na compreensão do escoamento e das características da turbulência nesse tipo de topografia. Whiteman e Doran (1993) consideraram o caso de um vale isolado com moderada profundidade, para estimar o escoamento em escala sinóptica no interior do mesmo. Atestaram a existência de quatro mecanismos que caracterizam os ventos que se estabelecem nesta característica topográfica:

- a) a força térmica, que atua no sentido de ascender o escoamento;
- b) uma força canalizada ao lado da parede do vale, que produz ventos escoando ao longo do eixo principal do vale e que pode gerar repentinos revezes na direção do vento, quando os ventos geostróficos se movem obliquamente de um lado para outro de uma linha normal ao eixo do vale;
- c) o transporte turbulento da quantidade de movimento no sentido descendente, para níveis mais inferiores, que define a direção predominante do vento dentro do vale;
- d) um gradiente de pressão canalizada, que guia os ventos ao longo do eixo principal do vale.

A importância relativa dos diferentes escoamentos depende do comprimento, profundidade e da largura do vale. Os dois primeiros mecanismos são mais importantes em vales estreitos e com laterais do tipo talude, enquanto os dois últimos são mais relevantes em grandes vales, com largura significativa e moderada profundidade.

3.2.3.2 Escoamento sobre Múltiplos Morros Sinusoidais Simétricos

Miller e Davenport (1998) estudaram o escoamento do vento sobre um número de superfícies complexas, bidimensionais com entorno liso e rugoso circundadas por outras de variada topografia, em um túnel de vento. Apresentaram respostas para o cálculo da razão da velocidade incremental do vento que se processa a barlavento da elevação e, principalmente, no cume da mesma. A pesquisa dos autores supracitados, sobre uma sucessão de idênticos cumes sinusoidais simétricos empregou vinte cumes com altura de 0,0965 m e espaçamento entre os mesmos de 0,61m. Foram testados dois tipos de superfícies, rugosa e lisa, com comprimentos de rugosidade, $1,6 \times 10^{-1}$ e $3,5 \times 10^{-2}$, respectivamente. A experiência mostrou que quando a camada limite encontra o primeiro cume, o escoamento se comporta como se encontrasse um morro isolado, dado que as medições do perfil de intensidade da turbulência acima do primeiro cume quando comparadas às correspondentes a sotavento, apresentaram-se equivalentes àquelas que seriam esperadas para uma elevação isolada. A formação da esteira no pé do primeiro cume deturpa o escoamento acima dos demais cumes, a sotavento. Significantes aumentos na magnitude das intensidades da turbulência vertical e longitudinal ocorrem até o terceiro cume, quando os perfis de intensidade passam a se estabilizar. Permanecem ainda razões incrementais de velocidades sobre os cumes subsequentes, mas seu valor é insignificamente reduzido frente àquele valor ocorrido sobre a primeira crista.

Quando estabelecida uma comparação entre dois perfis de velocidade horizontal acima do terceiro cume, para coberturas rugosa e lisa de um morro, o perfil a sotavento mostra que a magnitude da velocidade incremental do vento para cumes lisos é bem maior que para cumes rugosos. Os autores acima dizem que a magnitude da velocidade incremental do vento - ΔV para superfícies rugosas é 30% maior e que a mesma é menor que para superfícies lisas.

3.2.3.3 Escoamento em Múltiplos Morros e Vales

Este tipo de terreno pode ser caracterizado por um terreno constituído por cumes de morros e vales identificados por grandes inclinações as quais dão origem a circulações termicamente induzidas tais como brisas morros/vales, sendo também responsável por modificações substanciais no escoamento sinótico (DURRAN, 1990; WHITEMAN; DORAN, 1993).

No ambiente em tela, o aquecimento diferencial dos lados dos altos morros ocasiona a elevação da temperatura, e os diferentes gradientes de pressão gerados desencadeiam os

ventos locais. As características dos sistemas de vento nessas regiões dependem da geometria e da orientação do vale. Os ventos de altos morros podem ser geralmente divididos em duas classes: ventos de ladeira ou ventos do vale.

Ventos de ladeira são produzidos por forças ascensionais ocasionadas pela diferença de temperatura entre o ar adjacente à encosta da ladeira e o ar do ambiente, na mesma altura, distante da mesma (por exemplo, sobre o centro do vale): os ventos de ladeira sopram de modo ascensional durante o dia e descensional durante a noite. Para manter a continuidade, uma circulação fechada se desenvolve no centro do vale, movendo o ar para níveis inferiores durante o dia e para níveis superiores, durante a noite. Uma circulação transversal transporta calor através do vale aquecendo ou resfriando toda atmosfera do mesmo, contribuindo, desta forma, para a formação de ventos. Estes ventos são produzidos por gradientes de pressão horizontal, que se desenvolvem como resultado das diferenças de temperatura entre o ar no vale e o ar na mesma altura sobre um entorno plano adjacente.

Os ventos do vale sopram paralelamente ao eixo longitudinal, dirigindo-se para níveis mais altos à noite e para níveis mais baixos, durante o dia. A circulação é fechada acima dos cumes dos morros, através de uma corrente de retorno soprando na direção reversa.

O desenvolvimento dos ventos dirigidos termicamente tem uma importante variação sazonal, tanto na frequência, como na intensidade, sendo geralmente mais forte no verão. As brisas de altos morros/vales podem ter também efeitos importantes na dispersão de poluentes dentro do vale. Semelhantemente ao relatado para brisas terra/mar, as brisas altos morros/vales estabelecem uma circulação fechada onde a pluma pode ficar presa e recircula, causando um acúmulo de poluentes dentro do vale. A estagnação de poluentes no fundo do vale pode ser favorecida pela inversão da temperatura que se desenvolve durante a noite e é abrandada pela crescente camada limite convectiva pela manhã. Para o tipo de topografia descrito, o escoamento só pode ser descrito através de extensas medições com o auxílio de simulações de modelos de capacidade provada (FINARDI; MORSELLI; JEANNET, 1987).

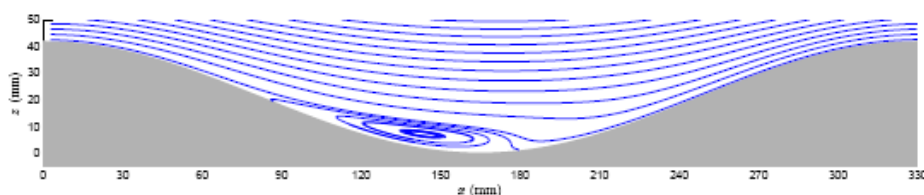
Experimentos em túnel de vento indicam que a velocidade ascendente do escoamento no sentido do cume dos morros e a distorção do escoamento na esteira a sotavento são máximos para o primeiro cume e vale, como se estes fossem únicos. Esses efeitos diminuem na direção do vento descendente, quando cumes e vales passam a interagir com o escoamento como um todo. Após os primeiros cumes, o fator de velocidade ascendente sobre os cumes se aproxima

de um valor constante de apenas uma unidade acima do valor encontrado para o primeiro cume e o perfil da velocidade no ponto máximo da característica topográfica assume uma forma logarítmica (MILLER, 1995).

Em vales entre cumes o escoamento médio é reduzido com possível formação de cavidades de recirculação sobre inclinações mais íngremes à sotavento, e a turbulência é consideravelmente aumentada, conforme representação Figura 26. Esses resultados têm sido confirmados em um recente estudo de campo de escoamento atmosférico sobre uma sucessão de cumes e vales sob condições próximas à neutralidade (MASON e KING, 1984). Declividades da ordem de 0,4, para terrenos complexos podem ser suficientemente suficientes para determinar a separação do escoamento. O exposto converge com a tese de Miller e Davenport (1998) e com a unanimidade dos autores aqui revisados.

Em áreas de geometrias extremas ou superposições de acidentes topográficos ou, para determinadas condições de vento, o escoamento atingindo simultaneamente um morro a barlavento e o contíguo a sotavento ou vice-versa, torna mais complexa a identificação dos pontos de início e término das zonas de recirculação. A extensão da região de recirculação é caracterizada mais precisamente através do ponto onde a coordenada horizontal μ do escoamento é zerada, ou seja, onde o escoamento médio é puramente vertical, como esboçado Figura 26 (CORBETT, 2007). A extensão da região de separação do escoamento depende da direção do mesmo e da presença de descontinuidade aguda ou marcante no perfil do terreno. O exposto é ilustrado pelas linhas de corrente mostradas na Figura 26, nas quais um corpo de recirculação mostra-se bem evidenciado.

Figura 26 - Representação das linhas de corrente de um escoamento sobre uma área complexa entre duas elevações (CORBETT, 2007).



Estas assertivas mostram que o comportamento de um escoamento sobre sucessão de cumes e vales é similar ao comportamento de um escoamento sobre sinusoidais simétricas, segundo a tese de Miller (1995).

A modelagem física em túnel de vento tem representado uma estratégia importante no crescimento do conhecimento do escoamento em terrenos complexos. A Figura 27 apresenta um modelo em escala empregado em estudos em túnel de vento, onde as seções de medição processam-se nos pontos assinalados. O exemplo enfatiza a necessidade de agregar também o conhecimento da climatologia regional do vento, além do emprego de adequadas ferramentas de micro localização de turbinas para a identificação dos efeitos de separação e recolamento do escoamento em regiões com extrema geometria do terreno (DERICKSON et al., 2004).

Figura 27- Modelo em escala de um terreno complexo típico empregado para experimentos em túneis de vento (DERICKSON et al., 2004).



Uma área composta por morros pode produzir padrões de escoamento complexo similar àquele produzido por grupos de prédios. Por exemplo, um canal de escoamento entre dois morros arredondados ou uma fenda entre um cume longo, frequentemente conduz a ventos fortes e persistentes. Esses efeitos são particularmente pronunciados na presença de uma estratificação estável, a qual força o deslocamento do escoamento ao redor, ao invés de, sobre os morros (ARYA, 1988).

4 MODELOS ANALÍTICOS

4.1 INTRODUÇÃO

Segundo Ayotte, Davy e Coppin (2001), a análise espacial e temporal do potencial eólico de uma dada região inicia-se com a análise estatística dos dados de velocidade e direção do vento coletados em estações meteorológicas. Neste levantamento de dados, evidencia-se as diferenças sazonais ocorridas no período dos dados coletados e analisados. Para fins de previsão do comportamento do escoamento em um terreno complexo, extrapolam-se as principais variáveis do vento, da altura coletada, para os pontos de interesse, adjacentes aos primeiros. Esta projeção é feita através de modelos simples de escoamento, com o emprego de equações linearizadas, que admitem o escoamento como neutramente estratificado. Estes modelos podem representar o escoamento em uma atmosfera real, sob um conjunto de circunstâncias limitadas (FINARDI; MORSELLI; JEANNET, 1987). Este é o motivo para serem estabelecidas comparações entre os resultados do ensaio do modelo com valores médios de campo obtidos sobre um período mínimo de amostragem. Com tais informações é possível concluir que as soluções obtidas por um dado modelo possam ou não representar uma aproximação do escoamento real.

Outra ferramenta que se alia na consolidação do mais próximo modelo da atmosfera real são os padrões, normas ou códigos de carga de vento. Constituem-se em linhas mestras e procedimentos empíricos que traduzem os efeitos da topografia e/ou edificações sobre um escoamento em uma área complexa, de acordo com a exposição e entorno a que a mesma está submetida. Esses padrões geralmente empregam parâmetros tais como: inclinação da característica topográfica e rugosidade do acidente topográfico em tela, de modo a prever os efeitos locais e a intensidade da velocidade incremental do vento sobre o mesmo. Esta consideração é extensiva a composição dos elementos de entorno.

Alguns esforços têm sido direcionados para expandir os limites nos quais um modelo pode ser validado. Exemplos de modelos não lineares de escoamento foram principalmente desenvolvidos por (XU e TAYLOR, 1992; WOOD e MASON, 1993; XU; AYOTTE; TAYLOR, 1994). No que se refere a modelos de grandes escalas sobre morros simples citam-se Beljaars, Walmsley e Taylor (1987); Ayotte, Xu e Taylor (1994); Ayotte e Taylor (1995) destacaram-se na melhor compreensão do fenômeno da turbulência (WOOD, 2000).

Miller e Davenport (1998) representaram um avanço na questão em sua investigação de um escoamento em túnel de vento sob um número de superfícies complexas bidimensionais. São responsáveis pelo estabelecimento dos principais parâmetros a serem considerados nos padrões de carga de vento para representar a influência topográfica no escoamento e na velocidade incremental do vento sobre as características topográficas. Essas diretrizes empregaram parâmetros topográficos de extensão simples tais como altura do morro "d", comprimento característico "L" e inclinação topográfica " θ ".

Em sua pesquisa acerca das linhas mestras para o cálculo da velocidade incremental do vento em terrenos complexos os referidos autores atestam que:

- a) a velocidade incremental do vento em uma área complexa é menor que aquela encontrada sobre morros isolados ou vales; Maharani et al. (2009) atestam que, em que pese os efeitos topográficos do vento próximo ao solo sejam muito significantes, uma vez que neste ponto o arrasto é máximo, a maioria dos códigos considera o aumento da velocidade do vento apenas proximamente aos cumes de morros, vales e/ou taludes. Segundo o autor, a maioria dos códigos desconsideram os efeitos topográficos de um terreno montanhoso ou ondulado e assumem como forma da característica do solo morros, cumes ou taludes tratados isoladamente. Entretanto, como o escoamento do vento não ocorre apenas sobre uma característica topográfica, mas sobre toda a superfície, não são avaliados, neste caso, os efeitos do escoamento sobre o entorno. É o caso da norma japonesa - AIJ que não é específica com relação a presença de terrenos ondulados ou montanhosos. Por outro lado, os efeitos de um terreno ondulado ou montanhoso são similares àqueles encontrados para superfície com grande rugosidade;
- b) a aplicação de linhas mestras simples padronizadas encontradas em códigos ou normas internacionais para a consideração das características topográficas complexas sobre o comportamento de um escoamento pode permitir resultados conservadores para o projeto, tais como a velocidade incremental do vento superestimada;
- c) significantes aumentos nos níveis de turbulência relativamente àqueles encontrados sobre superfícies planas de similar rugosidade são encontrados em áreas complexas.

Segundo Jonh et al. (2009), os valores para o fator topográfico aumentam na mesma proporção do aumento do ângulo da elevação, quando a posição de interesse é mudada progressivamente da base para o cume.

Consoante Holmes (2001), as normas de carga de vento devem contemplar os seguintes parâmetros e características:

- a) a definição das características do vento, especificação da base ou referência da velocidade do vento para várias localizações ou zonas. De modo geral, é adotada a altura de referência de 10 m em terreno aberto;
- b) fatores de modificação para os efeitos da altura e tipo do terreno e algumas vezes para trocas de terreno, direção do vento, topografia;
- c) fatores de forma (coeficientes de força, ou pressão) no que se refere a estruturas;
- d) fator que considera cargas adicionais devido a rajadas.

Por outro lado, constituem-se limitações na abrangência das normas analíticas a identificação das cargas de vento em edificações com geometria incomum incluindo os efeitos originados por entornos de topografia complexa.

Para Ngo e Letchford (2008), dentre os padrões que atualmente mais avançaram para definição da carga do vento, sob o aspecto do fator topográfico, os a seguir considerados nesta pesquisa, além da NBR 6123(1988):

- a) European Standard: Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, CEN TC 250: 2002;
- b) Australian/New Zealand Standard: Minimum Design Loads on Structures, AS/NZS 1170.2: 2002;
- c) Architectural Institute of Japan AIJ: 2004;
- d) American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95 (ASCE 7-95), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures;
- e) National Building Code of Canada, (NBCC 2005).

Este estudo contempla alguns dos principais modelos que iniciaram o estudo do comportamento do vento, a saber os modelos de Jackson e Hunt (1975) e de Davenport, Surry e Lemelin (1988) seguidos da Norma Brasileira NBR 6123 (1988) e dos referenciais supramencionados.

4.2 NORMAS TÉCNICAS E MODELOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS TOPOGRÁFICOS

4.2.1 Introdução

Os métodos disponíveis para avaliar a modelagem do escoamento atmosférico sobre terrenos complexos são divididos em dois grandes grupos: Modelos de Diagnóstico e Modelos de Prognóstico. Segundo Finardi, Morselli e Jeannet (1987), Modelos de Diagnóstico são aqueles modelos de escoamento capazes de reconstruir o campo estável de vento, a partir de dados experimentais. Modelos de Prognóstico são aqueles capazes de descrever a evolução das variáveis meteorológicas no tempo, a partir do estado inicial, incluindo os efeitos de variação das condições limites.

A ênfase desta pesquisa centra-se em Modelos de Diagnóstico, representados nesta investigação, principalmente pelos modelos e padrões, cargas ou normas de carga de vento nominados. Para concepção de um projeto estrutural, deverão ser consideradas as cargas de vento presentes, tais como pressões do vento, ações de turbulência sobre parte ou toda a estrutura e as pressões estáticas e induzidas pela esteira a sotavento da mesma. As normas de vento oferecem as cargas mínimas que edificações e outras estruturas devem ser projetadas para resistir.

Este estudo desenvolveu a análise relativa às especificidades e às considerações entre dois modelos empíricos e cinco normas de carga de vento supracitadas, tendo como um de seus focos a equalização entre os parâmetros que os códigos empregam na determinação das velocidades básicas, de referência, fatores topográficos e de forma e pressões de projeto. Esses parâmetros são comparados aos seus similares à luz da NBR-6123 (1988). Dado que os métodos para a consideração destes parâmetros são diferentes em cada norma, essas diferenças são examinadas, bem como suas similitudes e diferenças, bem como os demais parâmetros não-contemplados na NBR-6123 (1988).

Relativamente às normas referenciadas pode-se identificar que as mesmas empregam um ou dois níveis de abordagem: simples e detalhado, de acordo com o tipo de estrutura, rígida ou flexível. As normas adotam de três a cinco tipos de exposição do terreno, que variam de acordo com a rugosidade do entorno. Cada uma apresenta diferentes valores de altura

gradiente " z_g ", de coeficiente exponencial " α " e de categoria de exposição similar. A velocidade de vento de referência é medida a 10 m acima do terreno, sendo a categoria I, aberto e plano. Para exemplificar, pode-se citar que, no quesito categoria de referência, o ASCE/SEI 7-05:2005 considera a categoria C, enquanto o AS/NZS 1170.2: 2002 emprega a categoria 2 e o NBCC (2005) emprega a categoria A, simbologias diferentes para correlacionar à mesma característica, plano e aberto, características estas que constituem a categoria de exposição de referência, em geral. Também foi constatado que os coeficientes que consideram altura e terreno não são idênticos em seus conceitos: o ASCE adota o coeficiente de exposição de pressão de velocidade - K_z , o AS/NZS 1170.2: 2002, o multiplicador de velocidade e o NBCC (2005), o fator de exposição C para medir tal coeficiente. Observa-se que o conceito atrelado a esses fatores não é idêntico, uma vez que possibilita uma análise subjetiva na adequação da área para categoria de exposição. Merece destaque o fato de os padrões ou normas práticas dos países limitarem-se a considerar apenas dois tipos de topografia: morros simétricos ou taludes.

4.2.2 Modelo de Jackson e Hunt (1975)

Até o surgimento de Jackson e Hunt (1975), a maioria dos trabalhos teóricos sobre o escoamento do vento considerava o escoamento do vento sem alteração acima do cume e ao longo de um morro (CORBY, 1954, ROKENES, 2009). Os citados autores consideraram sobre um morro baixo, bi-dimensional para o desenvolvimento de um método analítico, para previsão do escoamento do vento sobre morros. Essa experiência provou a existência de uma fatia incremental no cume do morro, a que denominaram de velocidade incremental do vento - ΔV no cume do morro., conforme mostrado na Figura 13 e calculado de acordo com a equação 7. Em que pese a teoria de Jackson e Hunt(1975) tenha sido criticada, medições de campo tem mostrado que ela é capaz de prever o escoamento médio razoavelmente bem, para morros com declividade moderada (ROKENES, 2009).

Kaimal e Finnigan (1994) estenderam os resultados de Jackson e Hunt (1975) para investigação da velocidade incremental do vento - ΔV sobre características topográficas simples com baixas inclinações com ângulos médios de inclinações entre 15° a 18° em relação ao escoamento médio e definiram as relações que seguem.

$\Delta V_{\text{máx}} \approx 1,6 h/L_s$ para morros assimétricos

$\Delta V_{\text{máx}} \approx 2,0 h/L_s$ para cumes bidimensionais

As aproximações acima têm faixa de aproximação na ordem de 15%.

4.2.3 Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988)

4.2.3.1 Introdução

Davenport, Surry e Lemelin (1988) constituíram seu modelo de aproximação LSD para estimativa da velocidade incremental do vento, para um escoamento neutramente estratificado, em qualquer direção, em uma altura acima do solo, sob duas ou três dimensões de uma elevação, seja esta um morro ou um talude. Os autores descrevem o padrão de cargas de vento conforme a equação 15.

$$w = q * C_e C_p C_g \quad \text{equação 15}$$

Onde:

w - pressão externa agindo estaticamente e na direção normal à superfície como uma pressão diretamente aplicada na superfície ou como uma sucção para fora a partir da superfície;

q - pressão da velocidade de referência;

C_e - fator de exposição que define a variação da pressão da velocidade com a altura. Sobre um terreno plano, o fator de exposição depende apenas da rugosidade do terreno;

C_p - coeficiente de pressão externa sobre a área da superfície considerada;

C_g - fator efeito de rajada.

4.2.3.2 Fator de Exposição Modificado

Segundo os autores, considerando a influência de uma elevação, o fator de exposição modificado é definido nos termos da equação 16.

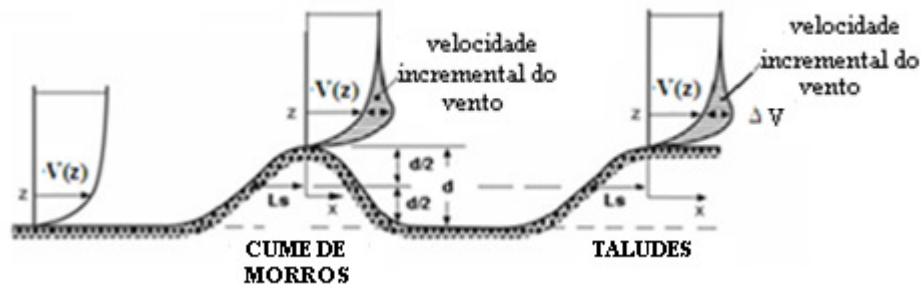
$$C_e^*(z) = C_e(z)(1 + \Delta V)^2 \quad \text{equação 16}$$

Onde:

ΔV – velocidade incremental do vento;

A Figura 28 apresenta esquematicamente a velocidade incremental do vento - ΔV em cumes de morros e taludes e a equação 17, quantifica-a, adimensionalmente segundo os autores Davenport, Surry e Lemelin (1988).

Figura 28 - Apresentação esquemática da velocidade incremental do vento em cumes e taludes – Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988).



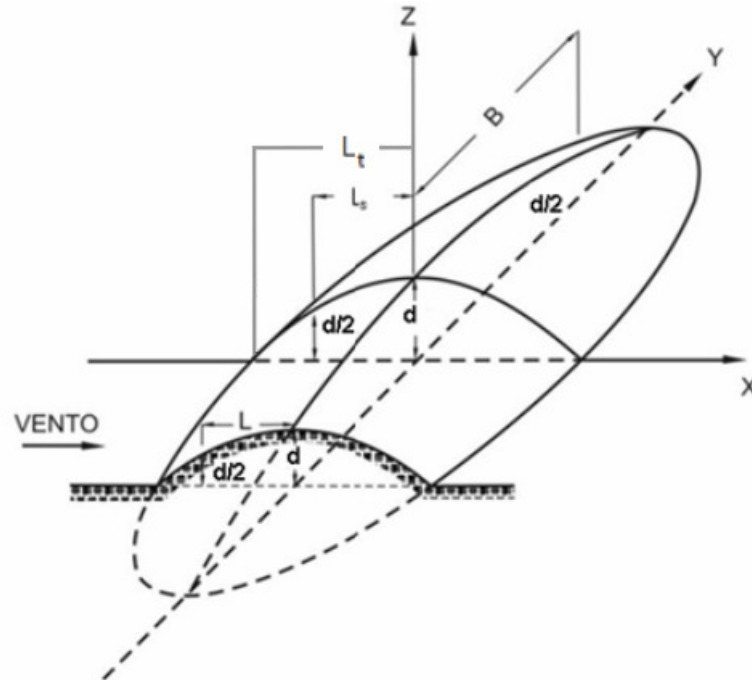
$$\Delta V = \Delta V_{\max} \left(\frac{1}{1 + 3(x/nL_s)^p} \right)^2 \left(\frac{1}{1 + a(z/L_s)} \right)^2 \quad \text{equação 17}$$

Os parâmetros de comprimento são definidos em um plano vertical, considerando um vetor velocidade do vento a barlavento e o ponto de interesse no morro.

x - distância horizontal entre o ponto de interesse e o ponto de máxima altura no plano.

A Figura 29 define os parâmetros representativos do modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988).

Figura 29- Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988).



Davenport definiu a velocidade incremental do vento para morros assimétricos analisados tridimensionalmente ou cumes analisados bidimensionalmente (também vales, onde o altura - d é negativa), nos moldes da equação 18.

$$\Delta V = 2,3F_r \frac{B/L_s}{(B/L_s + 0,4)} \quad \text{equação 18}$$

Onde:

B/L_s - declividade;

B - distância entre o mais alto ponto do morro e o ponto com a metade da altura, na direção contrária ao vento. Para um morro assimétrico, este parâmetro deve ser tomado a partir do lado que tem a maior distância;

L_s - distância entre o mais alto ponto do morro e o ponto com a metade da altura do morro no sentido do vento;

F_r - fator de rajada (NBR 6123), ao que o autor denomina G ;

Em caso particular, onde o plano de interesse passa através do ponto mais alto da elevação, $L_s = L_T$, sendo L_T o comprimento total do lado menor do morro.

A Tabela 4 fornece os valores aproximados de $\Delta V_{\text{máx}}$, n e a .

Tabela 4 - Valores dos parâmetros: $\Delta V_{\text{máx}}$, n e a, para morros assimétricos analisados tridimensionalmente e cumes, bidimensionalmente (ou vales com d negativo).

$\theta = d/L$	F_r	L	a	n	P
$\leq 0,4$	θ	d/ θ	2.0	2.0	2.0
$> 0,4$	0,4	2,5 d	2.0	2.0	2.0

onde:

θ - declividade média;

n , a - multiplicadores de acordo com Davenport, Surry e Lemelin (1988);

F_r - Fator de rajada;

A velocidade incremental do vento ΔV em função do fator de rajada F_r é definida pela equação 19.

$$\Delta V = 1,3 F_r \quad \text{equação 19}$$

A Tabela 5 contém valores aproximados dos parâmetros $\Delta V_{\text{máx}}$, n e a para taludes.

Tabela 5 - Valores aproximados dos parâmetros: $\Delta V_{\text{máx}}$, a, n e p para taludes.

$\theta = d/L_s$	F_r	L_s	a		n	p
$\leq 1,0$	θ	d/ θ	2.0	$x \leq 0$	1.0	2.0
				$x > 1,0$	5.0	1.0
$> 1,0$	1.0	d	0,6	$x \leq 0$	2.00,5	2.0
				$x > 1,0$	10.0	1.0

Davenport, Surry e Lemelin (1988) recomendam que diques e aterros sejam tratados como taludes, em casos em que o platô horizontal a sotavento seja $> 2L_s$. Quando o platô for $<$ que $2L_s$, essas elevações deverão ser tratadas como cumes.

4.2.4 Norma Brasileira NBR 6123 (1988)

A norma brasileira define as forças estáticas devidas ao vento a partir da velocidade básica do vento - V_o , adequada ao local de interesse. Esse parâmetro multiplicado pelos fatores topográfico- S_1 , de rugosidade e de classes de dimensões das edificações - S_2 , e estatístico - S_3 , configura a velocidade característica do vento - V_k .

Um talude ou um morro de altura “d” causam um aumento na velocidade do vento em virtude do efeito Venturi. O efeito será máximo para o vento soprando perpendicularmente à linha do cume e para um talude ou morro de grande largura (dimensão perpendicular ao vento). Essa característica configura o escoamento como bidimensional (BLESSMANN, 1995).

Blessmann identifica a existência de uma altura de influência - h_i , que depende da forma e dimensões do talude ou morro, bem como do gradiente térmico vertical. De acordo com o autor em tela, esta altura, em geral, situa-se entre $3d$ e $4d$.

Para inclinações até 17° , o aumento da velocidade causada pelo efeito Venturi aumenta com a inclinação da característica topográfica.

A velocidade básica - V_o é tomada a partir do gráfico das isopletras da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5 m/s, conforme Figura 30.

Figura 30 - Isopletas da velocidade básica - V_0 (m/s) (NBR 6123).



4.2.4.1 Fator Topográfico S_1

Este fator considera as variações do relevo do terreno e é determinado conforme os seguintes critérios:

a) Terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$;

b) Taludes e morros:

Taludes e morros alongados de modo que o escoamento do ar seja considerado bidimensional, soprando conforme sentido indicado figura a seguir:

No ponto A, conforme Figura 31 e nos pontos A e C, conforme Figura 32: $S_1 = 1,0$.

Figura 31- Fator topográfico $S_1(z)$ para morros - NBR 6123 (1988).

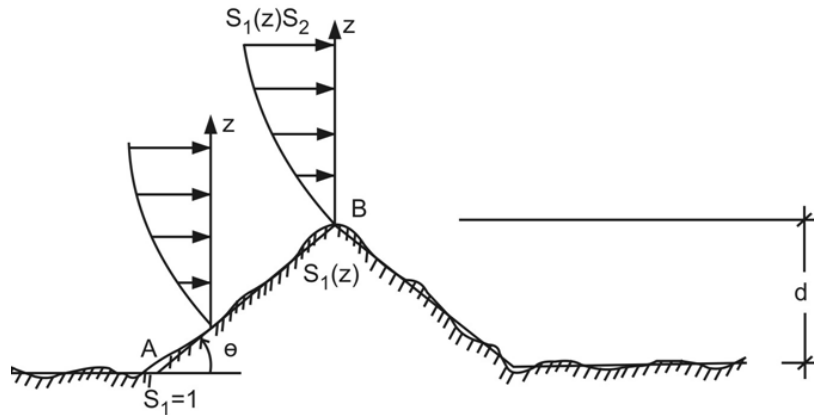
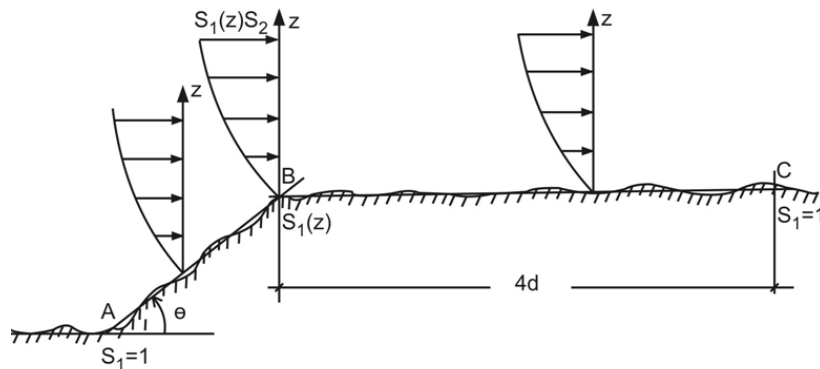


Figura 32 - Fator topográfico $S_1(z)$ para taludes - NBR (1988).



No ponto B: S_1 é uma função de $S_1(z)$ nos termos das equações 20, 21 e 22:

$$\theta \leq 3^\circ: S_1(z) = 1,0; \quad \text{equação 20}$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ: S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d (\text{tg} (\theta - 3^\circ))) \geq 1; \quad \text{equação 21}$$

$$\theta \geq 45^\circ: S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d) 0,31 \geq 1; \quad \text{equação 22}$$

Para valores entre $3^\circ < \theta < 6^\circ$ e $17^\circ < \theta < 45^\circ$, interpolar linearmente .

Para vales profundos protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1 = 0,9$.

4.2.4.2 Fator S_2 : considera o efeito combinado da:

- a) rugosidade do terreno;
- b) menor dimensão horizontal de uma edificação, dimensão de uma peça estrutural segundo a direção do vento ou parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2 ;
- c) altura acima do terreno.

a) Rugosidade do terreno: é classificada em cinco categorias, a saber:

- Categoria I: superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e no sentido do vento incidente. Ex: mar calmo, lagos, rios, pântanos sem vegetação;
- Categoria II: terrenos abertos, em nível, ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m. Ex: zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias, fazendas sem sebes ou muros;
- Categoria III: terrenos planos ou ondulados 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 3,0 m. Ex: 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;
- Categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não podem ser consideradas na Categoria V;
- Categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 m. Ex: florestas com árvores altas ou copas isoladas, centros de grandes cidades, complexos industriais bem desenvolvidos.

b) dimensões da edificação ou parte dela, em consideração:

- A NBR 6123(1988) considera três classes de edificações, partes destas e seus elementos, com intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de, respectivamente, 3, 5, 10 segundos;

- Classe A: todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m;
- Classe B: toda edificação ou parte dela para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 m;
- Classe C: toda edificação ou parte dela para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

c) altura acima do terreno:

O fator S_2 , empregado no cálculo da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido pela expressão contida na equação 23:

$$S_2 = b \cdot F_r (z/10)^p \quad \text{equação 23}$$

Onde:

F_r - fator de rajada deve ser sempre empregado o correspondente à categoria II. A expressão acima é aplicável até altura gradiente - z_g , que define o contorno superior da C.L.A;

b - menor dimensão horizontal de uma edificação, dimensão de uma peça estrutural segundo a direção do vento ou parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2 .

Os parâmetros que permitem determinar S_2 para as cinco categorias desta norma são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros meteorológicos.

Categoria	Z_g (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b p	1,10 0,06	1,11 0,065	1,12 0,07
II	300	b Fr p	1,00 1,00 0,085	1,00 0,98 0,09	1,00 0,95 0,10
III	350	b p	0,94 0,10	0,94 0,105	0,93 0,115
IV	420	b p	0,86 0,12	0,85 0,105	0,84 0,135
V	500	b p	0,74 0,15	0,76 0,16	0,71 0,175

Fonte: NBR 6123(1988)

Os valores de S_2 para as diversas categorias de rugosidade do terreno e classes de dimensões das edificações são dados na Tabela 7:

Tabela 7 - Fator S_2

Z (m)	CATEGORIAS														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
10	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
15	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
20															
30	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
40	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
50	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
60	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,05	1,01
80															
100	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
120	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
140	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
160	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,20	1,16	1,14
180															
200	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
	---	---	---	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
250	---	---	---	---	---	---	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
300	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,34	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26
350	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
400	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
420	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,32	1,32	1,32
450	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,34	1,34	1,34
500															

Fonte: NBR 6123(1988)

A Norma NBR 6123(1988) também apresenta a determinação do fator S_2 para intervalos de tempo entre 3s e uma hora, para qualquer rugosidade do terreno.

4.2.4.3 Fator Estatístico S_3

O fator estatístico - S_3 , baseado em conceitos probabilísticos, leva em consideração o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Este fator mostra a probabilidade de a velocidade básica - V_0 ser igualada ou excedida em um período de recorrência médio de 50 anos seja de 63%.

A Tabela 8 apresenta os valores mínimos para o fator estatístico S_3 .

Tabela 8 - Valores mínimos do fator estatístico S_3 .

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou a possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos Grupos de 1 a 3, durante a construção	0,83

4.2.5 European Standard: EUROCODE 1: Basis of Design and Actions on Structures-CEN TC 250:2002.

O European Wind Load Code-Eurocode Wind Action considera para efeito de carga na estrutura as ações turbulentas do vento sobre parte ou toda a estrutura, as pressões estáticas e flutuantes induzidas pela esteira atrás da estrutura e as forças flutuantes induzidas pelo movimento (RUSCHEWEYH, 1996). Para tanto, os efeitos topográficos são ponderados no cálculo da velocidade do vento, quando a inclinação média da característica topográfica a sotavento, tais como montes, vales, taludes e penhascos, exceder a 5% de declividade e onde as características da velocidade do vento aumentem mais que 5%.

4.2.5.1 Velocidade Média do Vento

A velocidade básica do vento ou velocidade de referência do vento (RUSCHEWEYH, 1996) $V_{10,II}^{**}(10)$ é definida como a velocidade média do vento em 10 min a 10 m de altura acima nível solo em um terreno de Categoria II, isto é um terreno plano e aberto com vegetação baixa, tal como grama com obstáculos isolados separados em uma distância mínima de 20 vezes a altura do obstáculo (NIEMANN, 2004), com um período de retorno de 50 anos (RUSCHEWEYH, 1996). O código considera os fatores da direcionalidade e sazonalidade, ambos iguais a unidade. Com essas condicionantes, a velocidade média do vento $\bar{V}(z)$ em

uma altura “z” de uma área depende da rugosidade do terreno na direção a qual o vento está soprando e dos efeitos topográficos. A norma adota o símbolo $c_t(z)$ para fator topográfico na altura z, o qual, por sua idêntica conceituação com o símbolo da NBR 6123 será por este substituído.

A velocidade média é definida conforme equação 24.

$$\bar{V}(z) = c_r(z) c_t(z) V_{10,II}^{**} \quad \text{equação 24}$$

Onde:

$c_r(z)$ - fator de rugosidade na altura z. Esse coeficiente descreve o efeito da rugosidade do terreno e é definido pela lei logarítmica.

$c_t(z)$ (CEN TC 250:2002) = $S_1(z)$ (NBR 6123) - fator topográfico

$V_{10,II}^{**}$ (10) - velocidade média do vento em 10 min a 10 m de altura acima nível solo em um terreno de Categoria II, isto é um terreno plano e aberto com vegetação baixa tal como grama e obstáculos isolados separados em uma distância mínima de 20 vezes a altura do obstáculo, com um período de retorno de 50 anos.

A equação 25 é aplicável para uma altura de $z_{\text{máx}} = 200$ m. Nesta norma, os efeitos topográficos da presença de um morro isolado no escoamento são considerados quando a declividade média do mesmo $\theta = d/L_u$ exceder a 5%.

Onde:

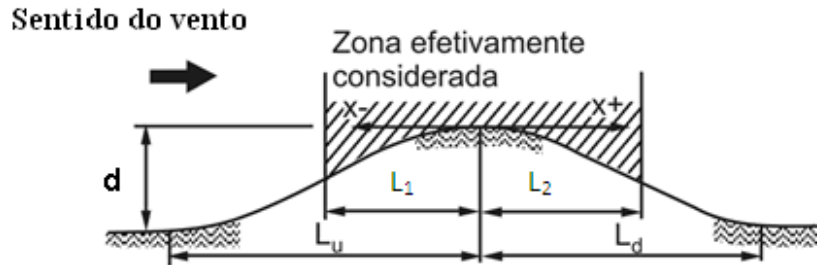
d - altura topográfica;

L_u - extensão horizontal da declividade conforme mostrado nas Figuras 33 e 34.

4.2.5.2 Metodologia

As zonas consideradas para os efeitos topográficos à luz da padrão **CEN TC 250(2002)** constam nas Figuras 33 e 34, respectivamente para colinas e vales e para taludes e penhascos.

Figura 33- Zona considerada para os efeitos topográficos-morros e vales, segundo CEN TC 250 (2002).



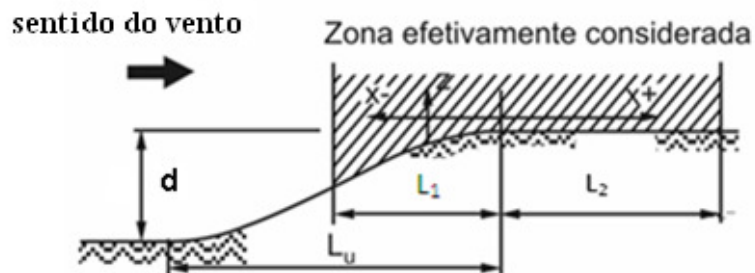
O intervalo da declividade determina os comprimentos L_1 e L_2 para morros isolados da zona efetivamente considerada para os efeitos topográficos, na forma das equações 25 e 26.

$$5\% < \theta \leq 30\%, L_1 = L_u/2 \quad \text{equação 25}$$

$$\theta < 30\%, L_2 = L_d/2, L_2 = 1.6d \quad \text{equação 26}$$

Da mesma forma os comprimentos L_1 e L_2 são definidos para taludes em conformidade com as equações 27 e 28.

Figura 34 - Zonas consideradas para os efeitos topográficos em taludes CEN TC 250(2002).



$$\text{Se } 5\% < \theta \leq 30\%, L_1 = L_u/2; \quad \text{equação 27}$$

$$\text{Se } \theta < 30\%, L_2 = 1.5L_u, \text{ ou } L_2 = 5d \quad \text{equação 28}$$

O fator de rugosidade - $c_r(z)$ é calculado nos termos das equações 29, 30 e 31.

$$c_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}, \quad \text{equação 29}$$

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_o}{z_{o,II}} \right)^{0.07} \quad \text{equação 30}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min} \quad \text{equação 31}$$

Onde:

$c_r(z)$ - fator de rugosidade na altura z . Descreve o efeito da rugosidade do terreno e é definido pela lei logarítmica;

$c_t(z)$ - fator topográfico na altura z , o qual tem coincidência conceitual com o parâmetro S_1 da NBR 6123 (1988);

z_o - comprimento de rugosidade;

$z_{o,II}$ - comprimento de rugosidade para terrenos na categoria 2 = 0,05;

z_{\min} - altura mínima abaixo da qual os efeitos do vento são admitidos como constantes. Depende da categoria do terreno, atende a Tabela 9;

k_r - fator depende da categoria do terreno.

A norma adota quatro diferentes categorias de terreno, descritas na Tabela 9 junto com o fator de terreno - k_r , o comprimento de rugosidade - z_o e a altura mínima - z_{\min} considerados no cálculo da velocidade média do vento em uma altura z .

Tabela 9 - Categorias de terreno e parâmetros relacionados segundo CEN TC 250(2002).

Categoria de terreno	k_r	$z_o(\text{m})$	$z_{\min}(\text{m})$
I - Mar aberto, zonas costeiras, lagos com, pelo menos 5 Km largura, áreas planas e lisas sem obstáculos.	0,17	0,01	2
II - Glebas de terra cultivada com cercas limítrofes, casas ou arvores ocasionais.	0,19	0,05	4
III - Áreas suburbanas industriais e florestas permanentes	0,22	0,3	8
IV - Áreas urbanas nas quais, pelo menos, 15% da superfície é coberta com edifícios e sua altura média excede 15 m.	0,24	1	16

Fonte: (RUSCHEWEYH, 1996).

4.2.5.2.1 Fator Topográfico

O dimensionamento do fator topográfico $c_t(z) = S_1(z)$ obedece aos intervalos das declividades constantes nas equações 32, 33 e 34, sendo calculado em função do fator de locação topográfica - s.

Para:

$$a) \theta < 5\%, c_t(z) = 1 \quad \text{equação 32}$$

$$b) 5\% < \theta < 30\%, c_t(z) = 1 + 2 s \theta \quad \text{equação 33}$$

$$c) \theta < 30\%, c_t(z) = 1 + 0,6 s \quad \text{equação 34}$$

Onde:

L_e - extensão efetiva da declividade a barlavento tomada como L_u quando $5\% < \theta < 30\%$ e como $d/0,3$ quando $\theta > 30\%$.

Nos casos das equações 32, 33 e 34, espera-se que o fator de locação topográfica - s, seja muito pequeno, menor que 0,05, podendo o valor da velocidade incremental do vento ser negligenciáveis e esse fator - ser tomado como zero e $S_1(z) = 1$.

$$a) (L_1/L_u) < -1,5, (L_2/L_e) > 3,5 \text{ para taludes; } \quad \text{equação 35}$$

$$b) (L_2/L_d) > 2,0 \text{ para morros e vales, ou } \quad \text{equação 36}$$

$$c) (z/L_e) > 2,0 \quad \text{equação 37}$$

4.2.5.2.1.1 Fator de locação topográfica

4.2.5.2.1.1.1 Áreas a Barlavento de todas as Características de Terreno

Para áreas a barlavento de todas as características de terreno, o fator de locação topográfica s é expresso pelas equações 38, 39 e 40.

$$s = A \exp\left(B \frac{L_1}{L_u}\right) \quad \text{equação 38}$$

Onde:

$$A = 0,1552 \left(\frac{z}{L_e}\right)^4 - 0,8575 \left(\frac{z}{L_e}\right)^3 + 1,8133 \left(\frac{z}{L_e}\right)^2 - 1,9115 \left(\frac{z}{L_e}\right) + 1,0124 \quad \text{equação 39}$$

$$B = 0,3542 \left(\frac{z}{L_e}\right)^2 - 1,0577 \left(\frac{z}{L_e}\right) + 2,6456 \quad \text{equação 40}$$

4.2.5.2.1.1.2 Áreas a Sotavento de Penhascos e Taludes

Para áreas a sotavento de penhascos e taludes, o fator de locação topográfica s é expresso pelas equações 41, 42, 43, e 44.

$$\text{Para } 0,1 \leq \frac{L_2}{L_e} \text{ e } 0,1 \leq \frac{z}{L_e} \quad s = A \left\{ \log\left(\frac{L_2}{L_e}\right) \right\}^2 + B \left\{ \log\left(\frac{L_2}{L_e}\right) \right\} + C \quad \text{equação 41}$$

$$A = -1,3420 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\}^3 - 0,8222 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\}^2 + 0,4609 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\} - 0,0791 \quad \text{equação 42}$$

$$B = -1,0196 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\}^3 - 0,8910 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\}^2 + 0,5343 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\} - 0,1156 \quad \text{equação 43}$$

$$C = 0,8030 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\}^3 + 0,4236 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\}^2 - 0,5738 \left\{ \log\left(\frac{z}{L_e}\right) \right\} + 0,1606 \quad \text{equação 44}$$

Para $0 \leq (L_2/L_e) < 0,01$, "s" é interpolado entre os valores de $L_2 = 0$ na equação 36 e $(L_2/L_e) = 0,1$ na equação 35.

Para $(z/L_e) < 0,1$, para a determinação do valor de "s" substitui-se z/L_e por 0,1 na equação 37.

4.2.5.2.1.1.3 Áreas a Sotavento de Morros e Cumes

Para áreas a sotavento de morros e cumes, o fator de locação topográfica "s" é expresso pelas equações 45.

$$s = A \exp\left(B \frac{L_2}{L_d}\right) \quad \text{equação 45}$$

onde A é calculado de acordo com a equação 46 e;

$$B = -0,30656 \left(\frac{z}{L_e}\right)^2 + 1,0212 \left(\frac{z}{L_e}\right) - 1,7637 \quad \text{equação 46}$$

O cálculo da velocidade de rajada na altura "z" acima da superfície do solo $\hat{V}(z)$ é relacionada a velocidade média $\bar{V}(z)$ por meio da intensidade longitudinal da turbulência $I_v(z)$, conforme equação 47.

$$\hat{V}(z) = \sqrt{1 + 7I_v(z)} \cdot \bar{V}(z) \quad \text{equação 47}$$

consequentemente,

$$\hat{V}(z) = \sqrt{1 + 7I_v(z)} \cdot c_r(z) S_1(z) V_{10,II}(10) \quad \text{equação 48}$$

$$I_v(z) = \frac{k_1^*}{S_1(z) I_n(z/z_0)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad \text{equação 49}$$

O fator de turbulência k_1^* é usualmente tomado como 1,0 e em caso de $z < z_{\min}$, z é substituído por z_{\min} na equação 49. Então, a velocidade média básica $V_{10,II}(10)$ pode ser

apresentada em termos da velocidade de rajada - \hat{V}_{10} . Para $z = 10\text{m}$, $z_0 = z_{0II} = 0,05$ e $S_1=1$ obtém-se $I_v(10) = 0,19$ e a velocidade média atende a equação 50.

$$V_{10,II}(10) = \frac{\hat{V}(10)}{\sqrt{1 + 7 I_v(10)}} = \frac{\hat{V}(10)}{1,524} \quad \text{equação 50}$$

Nesse caso, a relação entre $\hat{V}(z)$ e $\hat{V}(10)$, sem os efeitos topográficos, obedece às equações 51 e 52 (NGO e LETCHFORD, 2008).

$$\hat{V}(z) = \frac{\sqrt{1 + 7 I_v(z) \cdot c_r(z) \cdot S_1(z)}}{1,524} \times \hat{V}(10) \quad \text{equação 51}$$

$$\hat{V}(z) = \hat{M}_{zt} \times \hat{V}(10) \quad \text{equação 52}$$

4.2.6 Australian/New Zealand Standard: Minimum Design Loads on Structures - AS/NZS 1170.2:2002.

A metodologia do padrão AS/NZS170.2:2002 para obtenção de dados de velocidade e carga de vento considera a velocidade básica do vento tomada regionalmente. Existem três tipos de velocidades do vento para cada região da Austrália. A cada tipo de velocidade do vento é associado um período de retorno ou intervalo de recorrência médio.

4.2.6.1 Velocidade Básica do Vento.

A velocidade básica regional é a velocidade de vento de rajada de 3 s a 10 m acima do solo, em terreno aberto. Os valores das velocidades básicas regionais são associados com as probabilidades anuais de 0,01, 0,02, 0,04 e 0,2 para determinada localização geográfica.

4.2.6.2 Metodologia

A influência de um morro pode ser desconsiderada se seu cume estiver distante do local da estrutura a ser analisada, por mais de dez vezes a altura do mesmo.

Além disso, em terreno ondulado considera-se que a elevação seja entendida como um morro, quando a inclinação sobre o terreno a barlavento estiver a uma distância de 500 m ou possuir declividade maior que 5%.

A velocidade de rajada na altura "z" acima do nível local do solo local, $\hat{V}(z)$ é relacionada ao padrão básico de velocidade de vento de rajada $\hat{V}_{2-3,II}(10)$, que é a velocidade de 2-3 s sobre 1 hora, a 10 metros de altura do solo, em terreno plano e aberto (categoria II). Este parâmetro é definido pela equação 53:

$$\hat{V}(z) = \left(\sqrt{K_z} \times M_t \right) \times \hat{V}_{2-3,II}(10) = \hat{M}_{zt} \times \hat{V}_{2-3,II}(10) \quad \text{equação 53}$$

Onde:

M_t - multiplicador topográfico;

M_{zt} - multiplicador terreno/altura. Representa a razão entre a velocidade de rajada $\hat{V}_n(z)$ na altura "z" acima do solo, sem qualquer topografia, e a velocidade de rajada na altura de 10m do solo, em um terreno da categoria II- $\hat{V}_{2-3,II}(z)$. M_{zt} é equivalente a $\sqrt{K_z}$ do Código ASCE/SEI 7-05. Não havendo correspondência na NBR 6123(1988), o conceito passa a ser simbolizado conforme a ASCE/SEI 7-05 na sequência analisada;

M_{zt} - determinado pela equação 54.

$$M_{zt} = \frac{\hat{V}_n(z)}{\hat{V}_{2-3,II}(10)} \quad \text{equação 54}$$

M_{zt} - multiplicador terreno/altura. Considera os efeitos da velocidade incremental do vento na característica topográfica;

$\hat{V}_n(z)$ - velocidade de rajada, sem velocidade incremental do vento em uma altura "z";

$\hat{V}_{2-3,II}(10)$ - velocidade de rajada de 2-3 s dentro de 1 hora, a 10 metros de altura do solo, em terreno de categoria "C", ou seja, plano e aberto.

Baseado no modelo de vento desenvolvido por Deaves e Harris (1978), o padrão horário da velocidade média do vento, em m/s, na altura z, é determinado pela equação 55.

$$\bar{V}(z) = \frac{u^*}{0.4} \left[\log_e \left(\frac{z}{z_o} \right) + 5.75 \left(\frac{z}{z_g} \right) - 1.88 \left(\frac{z}{z_g} \right)^2 - 1.33 \left(\frac{z}{z_g} \right)^3 + 0.25 \left(\frac{z}{z_g} \right)^4 \right] \quad \text{equação 55}$$

Onde:

u^* - velocidade de fricção;

z_0 - comprimento de rugosidade característico do terreno;

z_g - altura gradiente, dada como segue equação 56;

z - altura acima terreno.

$$z_g = \frac{u^*}{6f} \quad \text{equação 56}$$

f - parâmetro de Coriolis. Depende da velocidade da rotação da terra e latitude da locação. É tomado como 10^{-4} na norma em questão;

Segundo Davies e Harris (1978), a relação entre $\hat{V}_n(z)$ e $\bar{V}(z)$ é dada pela equação 57.

$$\hat{V}_n(z) = \bar{V}(z) \left[1 + 3.7 \left(\frac{\sigma_v}{\bar{V}(z)} \right) \right] \quad \text{equação 57}$$

Onde:

σ_v - desvio padrão da componente de rajada do vento, dado pela equação 58.

$$\sigma_v = 2.63\eta(u^*) \left[0.538 + 0.09 \log_e \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]^{\eta^{16}} \quad \text{equação 58}$$

Onde η é definido pela equação 59.

$$\eta = 1 - \frac{z}{z_g} \quad \text{Equação 59}$$

Quando a declividade média $\theta = d/(2L_s)$ de um morro, vale ou talude é igual ou maior que 5%, os efeitos da velocidade incremental do vento são significantes, e M_h é determinado conforme segue equação 60.

$$M_h = 1 + \left(\frac{d}{3.5(z + L_1^*)} \right) \left(1 - \frac{|x|}{L_2^*} \right) \quad \text{equação 60}$$

Onde:

M_h - multiplicador forma do morro;

L_1^* - maior valor entre $0,36 L_s$ ou $0,4 d$;

L_2^* - meio comprimento horizontal do morro entre eixo vertical que passa no cume do mesmo e o fim da elevação;

d - altura morro;

z - altura acima terreno;

x - comprimento horizontal a partir do eixo até o ponto de interesse.

Especialmente para $\theta \geq 0,45$, conforme Figura 35, a zona de separação ocorre no cume. Dentro desta zona, os efeitos da velocidade incremental do vento não diminuem em uma direção vertical e o multiplicador forma do morro M_h é dado pela equação 61.

$$M_h = 1 + 0,71 \left[1 - \frac{|x|}{L_2^*} \right] \quad \text{equação 61}$$

As Figuras 35, 36 e 37 detalham a simbologia dos formas topográficas segundo AS/NZS 1170.2:2002.

Figura 35 - Efeitos topográficos de morros e cumes (AS/NZS 1170.2:2002).

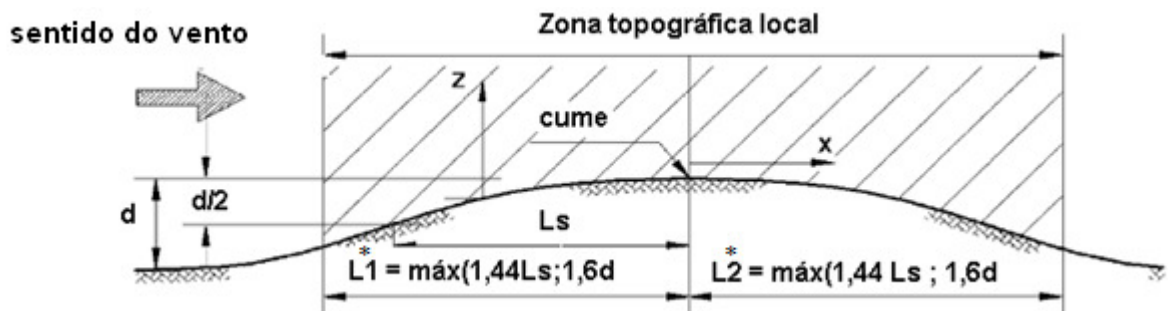
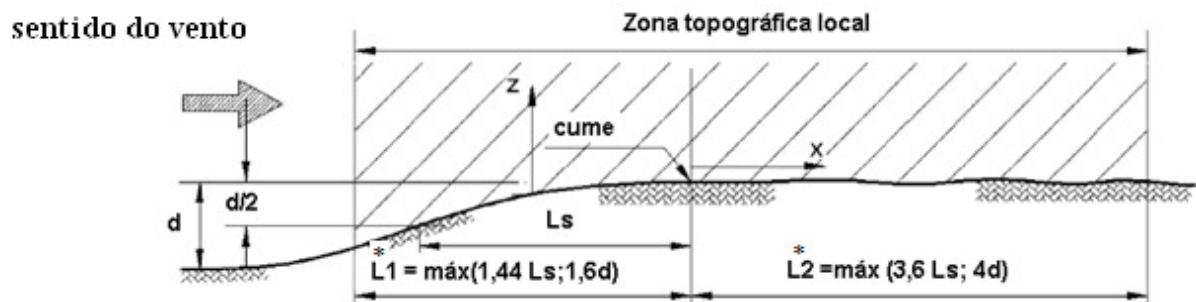
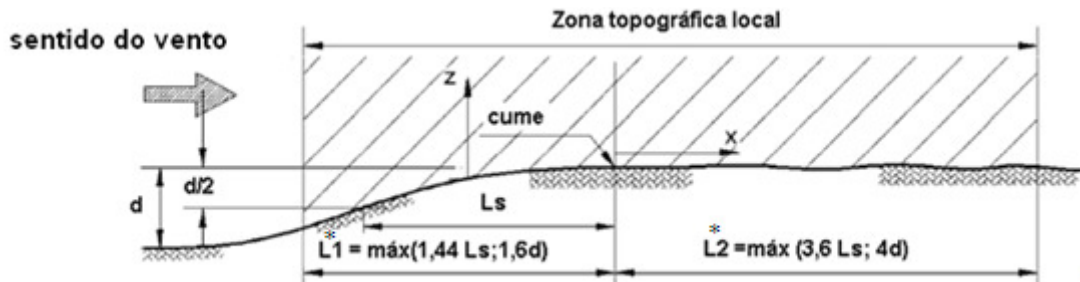


Figura 36 - Efeitos topográficos em taludes (AS/NZS 1170.2:2002).



Para taludes, a inclinação média do vento medida desde o cume até a distância de $3,6 L_s$ ou $4d$ não excede 0,05.

Figura 37 - Efeitos da velocidade incremental do vento na zona de separação (AS/NZS 1170.2:2002).



Em que pese a presente tese esteja focada no exame das cargas estáticas, vale enfatizar que a norma em análise, uma vez tendo estabelecido uma única metodologia para o cálculo das cargas de vento, a mesma considera as cargas dinâmicas no parâmetro fator de resposta dinâmica", simbolizado por C_{dyn} . Esse fator prevê o aumento de carga de vento efetiva como uma resposta dinâmica ressonante, isto é, vibrações induzidas pelo vento.

4.2.7 Architectural Institute of Japan - AIJ: 2004

4.2.7.1 Velocidade do Vento Projetada

A velocidade do vento para projeto V_H (m/s) depende da velocidade básica do vento $V_{10,II}^*$ (10) m/s, a qual é a velocidade do vento média sobre um terreno plano, aberto (Categoria II) em uma pequena elevação de 10 m, em um tempo de recorrência de 100 anos. V_H é calculado para cada direção do vento e é definido conforme equação 62.

$$U_H = V_{10,II}^* (10) K_D E_H k_{rw}, \quad \text{equação 62}$$

Onde:

U_H - velocidade básica do vento dependendo da localização geográfica de construção do site, obedecendo à conformação de distribuição das isopletras da velocidade básica do vento.

K_D - fator de direcionalidade do vento;

E_H - fator perfil da velocidade do vento em uma altura d ;
 k_{rw} - fator de conversão do período de recorrência considerado.

4.2.7.2 Velocidade Básica do Vento.

A velocidade básica do vento $V_{10, II}^*(10)$, corresponde a velocidade média do vento em 10 min em uma pequenas elevação de 10 m, com um tempo de recorrência de 100 anos. A velocidade do vento é definida pelas isopletas do mapa contido na Figura 38.

Figura 38 – Isopletas da velocidade básica do vento no Japão, média de 10 min a 10 m do solo, em m/s (AIJ, 2004).



4.2.7.3 Metodologia

4.2.7.3.1 Fator de Direcionalidade do Vento

O fator de direcionalidade do vento K_D reflete a característica direcional dos ventos extremos, os quais são influenciados pela locação geográfica e pela característica topográfica do local. Conforme norma AIJ, os valores de K_D variam de 0,85 a 1,0, de acordo com a região e com a

direção analisada. Para um escoamento do vento que se aproxima na direção da inclinação máxima da característica topográfica, o valor de $K_D = 1$.

4.2.7.3.2 Fator Perfil de Velocidade do Vento

O fator perfil da velocidade do vento E . É calculado pela equação 63.

$$E = E_r E_g \quad \text{equação 63}$$

Onde:

E_r - fator de exposição para categorias de terreno plano, conforme Tabela 10. É definido de acordo com a categoria a que a área se inclua;

E_g - fator topográfico. Esse fator tem o mesmo conceito de S_1 da NBR 6187. Desta forma passamos a adotar a mesma simbologia $S_1(z)$.

A Tabela 10 dispõe os fatores de exposição de acordo com categorias e condições área a barlavento.

Tabela 10 – Categorias de terreno (AIJ: 2004)

superfície lisa	Categoria	Condições da área e região a barlavento
↑	I	aberta, sem obstruções significantes, mares e lagos
	II	aberta, poucas obstruções. Ex: áreas de agricultura
	III	suburbana, com poucos e altos edifícios
	IV	cidade com altos edifícios
↓	V	área urbana com pesadas obstruções oriundas da concentração de edifícios
rugosa		

Fonte: AIJ:2004.

O fator de exposição baseado em categorias de terreno plano é definido conforme equações 64 e 65.

$$\text{a) para } z_b < z \leq z_G \quad E_r = 1,7 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{p^*} \quad \text{equação 64}$$

$$\text{b) para } z \leq z_b \quad E_r = 1,7 \left(\frac{z_b}{z_G} \right)^{p^*} \quad \text{equação 65}$$

Onde:

z (m) - altura acima terreno;

z_b, z_G, p^* - parâmetros que determinam o fator de exposição, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros determinantes de $E_r - z_b, z_G, p^*$ (AIJ: 2004).

Terreno	I	II	III	IV	V
z_b (m)	5	5	10	20	30
z_G (m)	250	350	450	550	650
p^*	0,1	0,15	0,2	0,27	0,35

Fonte: AIJ:2004.

O fator topográfico traduz a alteração do escoamento em terrenos complexos. As Figuras 39 e 40 indicam os parâmetros considerados e a equação 64 mostra o cálculo desse fator segundo a AIJ(2004).

Figura 39 – Parâmetros considerados no cálculo do fator topográfico de morros, segundo AIJ(2004).

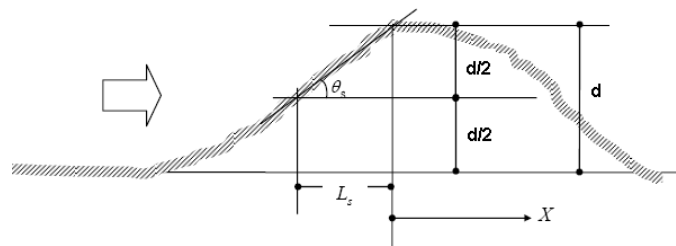
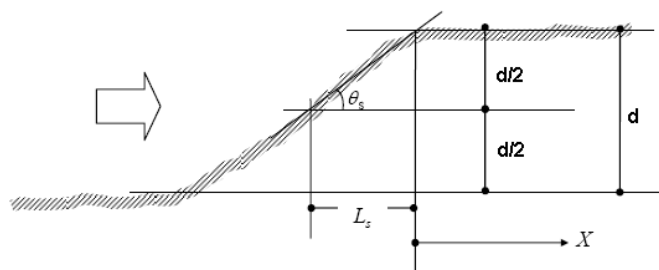


Figura 40 - Parâmetros considerados no cálculo do fator topográfico de taludes, segundo a AIJ(2004).



$$S_1 = (C_1 - 1) \left(C_2 \left(\frac{z}{d} - C_3 \right) + 1 \right) \exp \left[-C_2 \left(\frac{z}{d} - C_3 \right) \right] + 1 \quad \text{e } S_1 \geq 1, \quad \text{equação 66}$$

Quando a inclinação θ calculada pela equação 67 for menor que $7,5^\circ$ ou x/d estiver fora da faixa considerada nas Tabelas 14 e 15 relativas aos valores correspondentes para E_I , não é necessário considerar o fator topográfico, isto é $E_I = 1$.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{d}{2L_s} \quad \text{equação 67}$$

Onde:

C_1, C_2, C_3 - parâmetros determinantes do fator topográfico E_I . Dependem da forma topográfica, da inclinação " θ " e da distância desde o topo da característica topográfica até a área de construção. Se $\theta > 60^\circ$ o fator topográfico é admitido como 60° ;

z (m) - altura acima solo. É admitido o mesmo valor que z_b quando este é menor que o próprio;

d - altura do acidente topográfico;

L_s - distância horizontal desde o topo da característica topográfica até o ponto onde a altura é metade da altura topográfica conforme Figuras 47 e 48;

As Tabelas 12 e 13 identificam os parâmetros determinantes de S_1 .

Tabela 12 - Parâmetros determinantes de S_1 – cumes (AIJ: 2004).

θ		x/d									
		-4	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	2	4	8
7,5°	C ₁	1,1	1,2	1,35	1,35	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1
	C ₂	1	1	1	1	1,5	1,2	1,1	2	1,6	0
	C ₃	0	0	0	0	0,2	0,2	0,2	0,5	0,9	0
15°	C ₁	1	1,05	1,2	1,25	1,3	1,4	1,3	1,25	0,35	0,65
	C ₂	0	0	1	1	1	1,5	1,5	2	3	2
	C ₃	0	0	0	0	0	0,5	0,6	1,1	0,2	0,3
30°	C ₁	0,75	0,55	0,85	1	1,2	1,3	1,25	1,2	1,1	1,02
	C ₂	1,5	2	2	0	1	2	2	1,6	1,7	1,7
	C ₃	0	0	0	0	0	1,1	1,3	2,1	2,2	2,8
45°	C ₁	0,75	0,55	0,2	0,75	1,15	1,2	1,15	1,12	1,1	1,02
	C ₂	1,5	2	2	3	1	2,5	2,5	2	1,6	1,3
	C ₃	0	0	0	0	0	1,2	1,9	2,2	2,5	3,2
60°	C ₁	0,75	0,55	0,2	0,2	1,15	1,12	1,15	1,12	1,1	1,02
	C ₂	1,5	1,5	1,8	3	1	2,2	2,5	2	1,6	1,3
	C ₃	0	0	0	0	0	1,8	2	2,3	2,6	3,4

Fonte: AIJ:2004.

Tabela 13 - Parâmetros determinantes de S_1 – taludes (AIJ: 2004).

θ		x/d									
		-4	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	2	4	8
7,5°	C ₁	1,15	1,3	1,5	1,5	1,6	1,45	1,3	1,3	1,2	1,15
	C ₂	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4
	C ₃	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
15°	C ₁	0,4	1,0	1,2	1,55	2,1	1,65	1,5	1,3	1,2	1,15
	C ₂	0,9	0	0,65	0,85	1	0,8	0,7	0,55	0,45	0,35
	C ₃	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
30°	C ₁	0,7	-0,5	1,05	1,1	1,3	1,3	1,25	1,2	1,15	1,1
	C ₂	0,65	1,2	1,65	1,5	1,45	1,3	0,9	0,9	0,85	0,6
	C ₃	-2	-2	1	0,8	0,3	0,3	0,5	0,7	1,2	1,4
45°	C ₁	0,8	0	-3,5	1,1	1,2	1,35	1,3	1,2	1,15	1,1
	C ₂	0,5	1	1,6	2	1,1	1,3	1,3	1,3	0,9	0,55
	C ₃	-2	-2	-2	0,8	0,3	0,2	0,75	1,05	1,4	2
60°	C ₁	0,6	0,1	-1,8	-2,4	1,2	1,4	1,35	1,25	1,15	1,1
	C ₂	0,65	0,9	1,3	2,6	2	1,8	1,7	1,5	0,85	0,45
	C ₃	-2	-2	-2	-1	0,5	0,5	0,8	1,2	1,9	3,1

Fonte: AIJ:2004.

4.2.7.3.3 Velocidade Média do Vento

A velocidade média do vento $\bar{V}(z)$ na altura "z" acima da superfície topográfica é obtida com a equação 68:

$$\bar{V}(z) = E_H V_{10,II}^*(10) = (C_e S_1(z)) V_{10,II}^*(10) \quad \text{equação 68}$$

Onde:

E_H - fator perfil da velocidade do vento em uma altura "d";

$V_{10,II}^*(10)$ - Velocidade básica do vento é máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, que pode ser excedida, em média, uma vez em 100 anos, a 10m sobre terreno plano e aberto, segundo AIJ:2004;

C_e - fator de exposição;

S_1 - fator topográfico.

De acordo com o referencial em tela, o fator de exposição C_e é definido como segue:

a) Para: $z \leq z_b$, é definido pela equação 69.

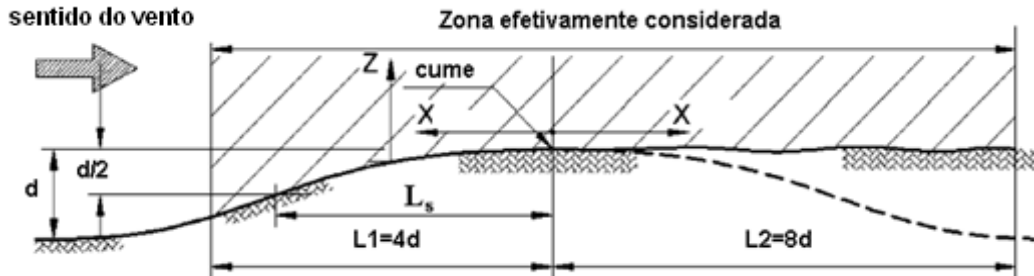
$$C_e = 1.7 \left(\frac{z_b}{z_G} \right)^p, \quad \text{equação 69}$$

b) Para: $z_b < z \leq z_G$, é definido pela equação 70

$$C_e = 1.7 \left(\frac{z}{z_G} \right)^p \quad \text{equação 70}$$

Para os efeitos da velocidade incremental do vento serem considerados, a inclinação deve ser $> 7,5^\circ$ ou declividade de 13,2% e as distâncias horizontais L_1 e L_2 , respectivamente, a partir do cume, devem estar contidas dentro de quatro vezes a altura topográfica "d" para locais de vento a barlavento e oito vezes para locais de vento a sotavento, conforme Figura 41, a qual detalha a topografia da zona efetivamente considerada.

Figura 41 - Zona efetivamente considerada para efeitos da influência da elevação no escoamento, segundo a norma AIJ (2004).



Para topografia com inclinações maiores que 60° ou declividades de $173,2\%$, o perfil do vento não muda com a inclinação θ . Neste caso, a inclinação é admitida como igual a 60° para efeito do cálculo dos efeitos da velocidade incremental do vento sobre graus de inclinação maiores.

De maneira a ser comparável com ASCE/SEI 7-05 e AS/NZS 1170.2:2002, a velocidade de rajada em 3s, $\hat{V}_{2,3}(z)$ é relacionada à velocidade média em 10 min, \bar{V}_{10} , empregando para tanto o fator de rajada de vento G proposto por Ishizaki (1983), conforme equação 71.

$$\hat{V}(z) = G\bar{V}(10) = \left\{ 1 + 0.5 I_z \ln \left(\frac{T}{t} \right) \right\} \bar{V}_{10}, \quad \text{equação 71}$$

Onde $T=10$ m, i.e., 600 s e $t=3$ s, desta forma $\hat{V}(z)$ é calculado pela equação 72:

$$\hat{V}(z) = (1 + 2.65 I_z) \bar{V}_{10} = (1 + 2.65 I_z) E_r E_t V_{10,II}^*(10), \quad \text{equação 72}$$

A velocidade média de 10 m, $\bar{V}(10)$ é apresentada em termos de $\hat{V}(z)$, pela equação 73. Neste caso, com $z=10$ m, $z_G=350$ m, $p=0,15$, $E_t=1$ e $S_1=1$, então $I_z=0,20$.

$$V_{10,II}^*(10) = \frac{\hat{V}_{10}}{1 + 2,65 I_z} = \frac{\hat{V}_{10}}{1,53} \quad \text{equação 73}$$

O fator \hat{M}_{zt} é definido pela equação 74:

$$\hat{V}(z) = \frac{(1 + 2,65I_z)E_r S_1}{1,53} \cdot \hat{V}_{10} = \hat{M}_{zt} \hat{V}_{10} \quad \text{equação 74}$$

4.2.7.3.4 Intensidade da Turbulência e Escala da Turbulência

A intensidade da turbulência I_z é definida de acordo com as condições de construção da área pelas equações 75, 76, 77.

$$I_z = I_{rz} \cdot E_{gI}, \quad \text{equação 75}$$

Onde:

I_{rz} - intensidade da turbulência na altura z em categorias de terreno plano;

E_{gI} - fator topográfico para intensidade da turbulência.

$$\text{a) Para } z_b < z \leq z_G, \quad I_{rz} = 0,1 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{-p-0,05} \quad \text{equação 76}$$

$$\text{b) Para } z \leq z_b, \quad I_{rz} = 0,1 \left(\frac{z_b}{z_G} \right)^{-p-0,05} \quad \text{equação 77}$$

Onde

z (m) - altura acima solo;

z_b, z_G, p : parâmetros determinantes do fator de exposição, conforme Tabela 11.

Quando a declividade for igual ou maior que 13,2%, a intensidade da turbulência é considerada como tendo sido afetada pela topografia. E_1 é o fator topográfico para desvios do padrão da velocidade do vento. C_{i1}, C_{i2} e C_{i3} são os parâmetros experimentais, os quais dependem da forma da topografia, da inclinação desta, da localização do terreno.

4.2.7.3.5 Fator Topográfico para Intensidade da Turbulência

O fator topográfico para intensidade da turbulência para a condição de taludes e formas agudas topográficas de cumes, tais como mostrado nas Figuras 39 e 40 e definido na forma da equação 78.

$$E_{gl} = \frac{E_I}{S_1}, \quad \text{equação 78}$$

Onde E_I é obtido pela equação 79.

$$E_I = (C_{i1} - 1) \left\{ C_{i2} \left(\frac{z}{d} - C_{i3} \right) + 1 \right\} \exp \left\{ -C_{i2} \left(\frac{z}{d} - C_{i3} \right) \right\} + 1 \geq 1, \quad \text{equação 79}$$

Onde:

E_I - fator topográfico para desvio padrão da flutuação da velocidade do vento. Quando a inclinação “ θ ” calculada a partir da equação 67 é menor que $7,5^\circ$, o fator topográfico admite o mesmo valor que para 60° ;

$E_g - S_1$ - fator topográfico para velocidade média do vento;

z - altura da característica topográfica. Admite-se o maior valor entre z_b e z_c quando este fator é menor que z_b na Tabela 14 ou que z_c nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Parâmetros determinantes de E_I -cumes (AIJ: 2004).

		-4	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	2	4	8
		7,5°	z_c/d	0	0	0	0	0	0	0	0
	C_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15°	z_c/d	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0	0
	C_1	1	1	1	1	1	3,4	4,2	4	2,8	2
	C_2	0	0	0	0	0	19	11	4,6	2	1,6
	C_3	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,6	0,7
30°	z_c/d	0	0	0	0	0	0,6	0,8	1,5	1,6	2,2
	C_1	1	1	1	1	1	1,6	1,9	2,2	3,2	2,7
	C_2	0	0	0	0	0	5	4	2	1,7	1,3
	C_3	0	0	0	0	0	0,4	0,6	1	0,7	0,5
45°	z_c/d	0	0	0	0	0	0,8	1,5	1,7	1,9	2,5
	C_1	1	1	1	1	1	1,4	1,7	2,1	2,8	2,8
	C_2	0	0	0	0	0	2,6	2,2	1,7	1,4	1,3
	C_3	0	0	0	0	0	0,8	1,1	1,2	0,9	0,5
60°	z_c/d	0	0	0	0	0	1,35	1,6	1,8	2	2,6
	C_1	1	1	1	1	1	1,6	1,8	2,1	2,9	2,9
	C_2	0	0	0	0	0	2	1,6	1,3	1,3	1,2
	C_3	0	0	0	0	0	1	1,2	1,2	0,8	0,6

Fonte: AIJ:2004.

Tabela 15 - Parâmetros determinantes de E_I – taludes (AIJ: 2004).

Θ		X/d									
		-4	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	2	4	8
7,5°	z_e/d	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	C_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15°	z_e/d	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0	0
	C_1	1	1	1	1	1	3,4	4,2	4	2,8	2
	C_2	0	0	0	0	0	19	11	4,6	2	1,6
	C_3	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,6	0,7
30°	z_e/d	0	0	0	0	0	0,6	0,8	1,5	1,6	2,2
	C_1	1	1	1	1	1	1,6	1,9	2,2	3,2	2,7
	C_2	0	0	0	0	0	5	4	2	1,7	1,3
	C_3	0	0	0	0	0	0,4	0,6	1	0,7	0,5
45°	z_e/d	0	0	0	0	0	0,8	1,5	1,7	1,9	2,5
	C_1	1	1	1	1	1	1,4	1,7	2,1	2,8	2,8
	C_2	0	0	0	0	0	2,6	2,2	1,7	1,4	1,3
	C_3	0	0	0	0	0	0,8	1,1	1,2	0,9	0,5
60°	z_e/d	0	0	0	0	0	1,35	1,6	1,8	2	2,6
	C_1	1	1	1	1	1	1,6	1,8	2,1	2,9	2,9
	C_2	0	0	0	0	0	2	1,6	1,3	1,3	1,2
	C_3	0	0	0	0	0	1	1,2	1,2	0,8	0,6

Fonte: AIJ:2004.

4.2.8 American Society of Civil Engineering Standard, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures - ASCE/SEI 7-05: 2005.

Neste código, uma característica topográfica deve ser desconsiderada por outras características topográficas similares dentro de cem vezes sua altura “d” ou 3,2 km, o menor valor entre os dois referenciais e deve projetar-se acima da altura das características do terreno a barlavento, para, no mínimo, um fator de dois, dentro de um raio de 3,2 km. A altura dessa característica topográfica deve ser maior que 4,5 m para fatores de exposição do tipo C e D (áreas abertas e planas) e 18 m para fatores de exposição do tipo B (áreas fortemente densificadas). Para declividades topográficas iguais ou maiores que 10%, o aspecto topográfico deve ser considerado para o cálculo da velocidade incremental do vento.

O método simplificado identifica como procedimento de projeto conforme segue:

4.2.8.1 Velocidade Básica do Vento

A velocidade básica corresponde à velocidade de rajada a 10m acima do solo na exposição C.

4.2.8.2 Metodologia

4.2.8.2.1 Fator de Direcionalidade do Vento- K_d

O fator de direcionalidade do vento é definido de acordo com o tipo de estrutura. A Tabela 16 mostra os valores para algumas estruturas e formas básicas.

Tabela 16 – Valores típicos para o fator de direcionalidade do vento- K_d
(ASCE/SEI 7-05: 2005).

Tipo da Estrutura	K_d
Edificações em geral	0,85
Telhados	0,85
Torres triangulares, quadradas	0,95
Outras formas	0,95

Fonte: ASCE/SEI 7-05: 2005.

A norma ressalta que o valor K_d deve apenas ser considerado quando a situação possa ser identificável como extrema, tais como cargas oriundas de enchentes e inundação, cargas de gelo.

4.2.8.2.2 Fator de Importância (ASCE/SEI 7-05: 2005)

O fator de importância considera a degradação e perigo para a vida humana e prejuízos à propriedade. Determinado pelas Tabelas 17 e 18 e baseia-se na categoria da ocupação de edifícios e estruturas.

Tabela 17 – Categoria de ocupação de edifícios e outras estruturas para vento (ASCE/SEI 7-05: 2005).

Categoria de ocupação de edifícios e outras estruturas para efeitos do vento	
Natureza da ocupação	Categoria da Ocupação
Edifícios e outras estruturas que representam baixo perigo à vida humana em um evento de risco, incluídas, mas não limitadas a Instalações agrícolas, temporárias de qualquer gênero e armazenamentos.	I
Todos as edificações que não constam nas categorias I, III, IV.	II
Edifícios e outras estruturas que representam substancial perigo a vida humana em um evento de risco, incluídas mas não limitadas a: edifícios e outras estruturas com mais de 300 pessoas na área; edifícios e outras estruturas que portem instalações de escolas elementares e secundárias com mais de 250 pessoas; instalações e outras instalações que portem instalações de faculdades para mais de 500 pessoas; instalações de saúde para até 50 pacientes não tendo cirurgias ou emergências. Edifícios e outras estruturas não incluídos na Categoria IV com potencial possibilidade de impacto e/ou destruição da vida da civilização dia pos dia incluídas mas não limitadas a: estações de geração de energia; estações de tratamento de água; estações de tratamento esgoto, centros de telecomunicação. Edifícios e outras ocupações que contêm substâncias tóxicas ou explosivas.	III
Edifícios e outras estruturas designadas como instalações, incluídas, mas não limitadas a: hospitais e outros centros de saúde com instalações cirúrgicas e de emergência.	IV

Fonte: ASCE/SEI 7-05: 2005.

Tabela 18 - Fator de Importância (ASCE/SEI 7-05: 2005)

Categoria	Regiões com inclinação com V=85-100 mph e Alasca	Regiões com furacão com V > 100 mph
I	0,87	0,77
II	1	1
III	1,15	1,15
IV	1,15	1,15

Fonte: ASCE/SEI 7-05: 2005.

4.2.8.2.3 Categorias de Exposição

A exposição deverá ser avaliada para cada direção do vento considerada. A categoria de exposição a barlavento deve ser baseada na rugosidade da superfície do solo, que é determinada a partir da topografia natural, vegetação e edificações de entorno.

4.2.8.2.4 Direção do Vento e Setores

Idealmente o vento deve ser avaliado em todas as direções. A norma ASCE/SEI 7-05: 2005 admite como procedimento normatizado para a determinação da direção das cargas de vento para consideração em edificações a investigação em oito direções do vento, com intervalos de 45°. Cada direção examinada deve contemplar dois setores de 45° cada, um em cada lado do eixo da direção do vento. O setor com exposição de carga mais alta será usado para definir as cargas do vento para aquela direção. A exposição nestes dois setores deve ser determinada de acordo com a categoria de rugosidade da superfície.

4.2.8.2.5 Categorias de Rugosidade da Superfície

A rugosidade do solo superficial dentro de cada setor de 45° deve ser determinada para uma distância a barlavento da área de interesse, de acordo com as categorias de exposição da mesma, conforme item 4.2.8.2.6.

- a) Superfície com rugosidade B: áreas urbanas e suburbanas, áreas de florestas ou outros terrenos com numerosos espaços de obstrução próximos um ao outro, tendo estes, pelo menos, o volume de uma habitação unifamiliar;
- b) Superfície com rugosidade C: áreas abertas com obstruções com altura geralmente menor que 9,1 m. Esta categoria inclui também todas as superfícies de água em regiões propensas a furacões;
- c) Superfície com rugosidade D: regiões planas desobstruídas, costeiras, excetuando-se as regiões propensas a furacões, contidas na superfície C.

4.2.8.2.6 Categorias de Exposição

- a) Exposição B: aplica-se quando as condições de rugosidade da superfície do solo, na direção a barlavento estiverem a, pelo menos, 792 m ou 20 vezes a altura da edificação, a mais desfavorável das duas;
- b) Exposição C: aplica-se para todos os casos onde as exposições B ou D não se aplicam;
- c) Exposição D: aplica-se onde a rugosidade superficial definida como rugosidade D prevalece na direção a barlavento por uma distância de 1.524 m ou 20 vezes a altura da elevação, a que for maior. A Exposição D deve ser adotada em áreas a sotavento

de rugosidade superficial B ou C para uma distância de 200 m ou 20 vezes a altura da edificação, a maior dentre as duas.

4.2.8.2.7 Coeficiente “Exposição Pressão Velocidade”

A altitude do terreno e os efeitos por este desencadeados no escoamento são considerados em um coeficiente denominado coeficiente de exposição de pressão de velocidade - K_z ou K_h . Este coeficiente é baseado na categoria de exposição do terreno e é definido nos termos da Tabela 19.

Tabela 19 – Coeficiente de exposição de pressão de velocidade K_h ou K_z (ASCE/SEI 7-05: 2005).

Altura acima nível solo, z (m)	Exposição			
	B		C	D
	Caso 01	Caso 02	Casos 1e2	Casos 1e2
0-4,6	0,7	0,57	0,85	1,03
6,1	0,7	0,62	0,9	1,08
7,6	0,7	0,66	0,94	1,12
9,1	0,7	0,7	0,98	1,16
12,2	0,76	0,76	1,04	1,22
15,2	0,81	0,81	1,09	1,27
18	0,85	0,85	1,13	1,31
21,3	0,89	0,89	1,17	1,34
24,4	0,93	0,93	1,21	1,38
27,4	0,96	0,96	1,24	1,4
30,5	0,99	0,99	1,26	1,43
36,6	1,04	1,04	1,31	1,48
42,7	1,09	1,09	1,36	1,52
48,8	1,13	1,13	1,39	1,55
54,9	1,17	1,17	1,43	1,58
61	1,2	1,2	1,46	1,61
76,2	1,28	1,28	1,53	1,68
91,4	1,35	1,35	1,59	1,73
106,7	1,41	1,41	1,64	1,78
121,9	1,47	1,47	1,69	1,82
137,2	1,52	1,52	1,73	1,86
152,4	1,56	1,56	1,77	1,89

Fonte: ASCE/SEI 7-05: 2005.

Observações:

01. Caso 1: a. todos componentes e revestimentos;

b. principal força resistente longitudinal e transversal em baixos edifícios.

Caso 2: a. todas as principais forças resistentes em edifícios exceto aqueles do item 01 e em demais estruturas.

02. O coeficiente exposição de pressão da velocidade K_z pode ser determinado a partir das equações 80 e 81.

$$\text{Para } z \leq 4,6 \text{ m} \Rightarrow K_z = 2.01 \left(\frac{4.6}{z_g} \right)^{2/p} \quad \text{equação 80}$$

$$\text{Para } 4,6 \leq z \leq z_g \Rightarrow K_z = 2.01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/p} \quad \text{equação 81}$$

Onde:

p - expoente da lei potencial para velocidade de rajada de 3s;

z_g - altura nominal da camada limite atmosférica.

03. Os valores dos parâmetros p e z_g são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Constantes de exposição do terreno (ASCE/SEI 7-05: 2005).

Constantes de exposição do terreno		
Exposição	P	z_g (m)
B	7	365,76
C	9,5	274,32
D	11,5	213,36

Fonte: ASCE/SEI 7-05: 2005.

4.2.8 2.8 Pressão da Velocidade

A pressão da velocidade - q_z em uma altura z é determinada conforme equação 82:

$$q_z = 0,613 K_z S_1 K_d \hat{V}_{3,C}^2 (10) I_* \quad \text{equação 82}$$

Onde:

$\hat{V}_{3,C}^2(10)$ - velocidade de rajada do vento sobre 3 segundos a 10 m acima do solo, na exposição Exposição C, onde as condições de rugosidade da superfície do solo são de terreno aberto com obstruções dispersas em alturas geralmente menores que 9,1 m. Ao símbolo adotado, definido conforme padronização da NBR 6123, na norma em questão, corresponde originalmente \hat{V}_{10} ;

K_z - coeficiente de exposição de pressão da velocidade;

S_1 - fator topográfico. Esse símbolo, definido pela equivalência conceitual com a NBR 6123, na norma em questão, corresponde K_{zt} ;

K_d - fator de direcionalidade do vento;

I^* - fator de importância. Considera o grau de perigo para a vida humana e prejuízo para a propriedade.

Baseado na suposição que o vento aproxima-se de uma característica topográfica na direção de sua inclinação máxima ($K_d = 1$), a velocidade de rajada do vento $\hat{V}(z)$, numa altura “z” sobre o nível do solo, em termos da velocidade de rajada a 10 m acima do solo $\hat{V}(10)$ é determinada pela equação 83:

$$\hat{V}(z) = \sqrt{K_z S_1 \hat{V}_{3,C}^2(10)} = \sqrt{K_z S_1} \hat{V}_{3,C}(10) = \hat{M}_{zt} \hat{V}_{3,C}(10) \quad \text{equação 83}$$

onde:

K_{zt} - originalmente adotado pela norma será entendido como S_1 por sua coincidência conceitual;

K_z - coeficiente de exposição;

$\hat{V}_{3,C}(10)$ - velocidade de rajada de 3s, a 10m da superfície em uma exposição do tipo C;

O fator $\hat{M}_{zt} = \sqrt{S_1 K_z} = \hat{V}(z) / \hat{V}_{3,C}(10)$ é definido como razão topográfica de rajada.

O efeito da velocidade incremental do vento é incluído no cálculo do projeto das cargas de vento através do fator topográfico S_1 que considera os multiplicadores topográficos K_1 , K_2 e K_3 , nos termos da equação 84. Estes multiplicadores consideram a aproximação do vento ao longo da direção da inclinação máxima do morro ou do talude.

$$S_1 = (1 + K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^2 \quad \text{equação 84}$$

K_1 - parâmetro relacionado ao tipo e forma da característica topográfica e ao efeito da velocidade incremental do vento. Valores constam na Tabela 21;

K_2 - parâmetro relacionado à redução da velocidade incremental do vento com a distância a barlavento ou a sotavento do cume. Dimensionado conforme equação 85;

K_3 - parâmetro relacionado à redução da velocidade incremental do vento com a altura acima do terreno local. Dimensionado conforme equação 86.

$$K_2 = 1 - \frac{|x|}{\mu L_s} \quad \text{equação 85}$$

$$K_3 = e^{-\gamma z/L} \quad \text{equação 86}$$

Onde:

x - distância a barlavento ou a sotavento, a partir do eixo vertical que passa no cume da elevação;

z - altura acima do nível do solo local;

L_s - distância horizontal a partir do cume ao ponto a barlavento onde a altura do morro é igual a $d/2$, conforme Figuras 42 e 43;

μ e γ - fatores de atenuação horizontal. Dependem do tipo de topografia e exposição. Valores representativos constam na Tabela 22;

Para valores maiores que 25% de declividade ou de $d/L_s > 0,5$, os efeitos da razão da velocidade incremental do vento não variam com a declividade. Desta forma, L_s é tomado como igual a $2D$ para o cálculo de K_1 , K_2 e K_3 .

A Tabela 21 identifica os multiplicadores topográficos para exposição do tipo C em conformidade com a simbologia adotada nas Figuras 42 e 43.

Figura 42 - Cumes bidimensionais ou morros assimétricos tridimensionais (ASCE/SEI:2006).

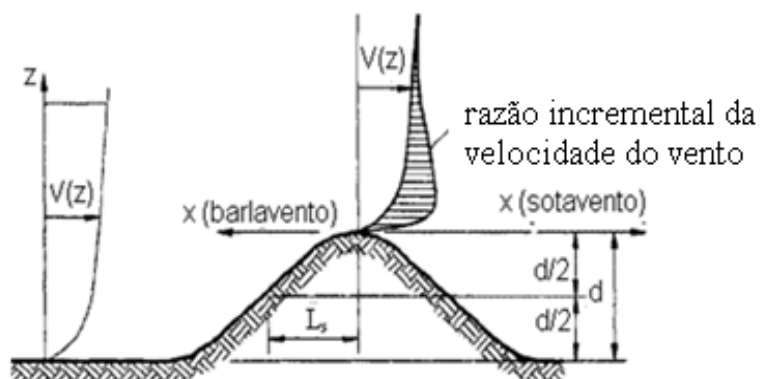


Figura 43 - Taludes (ASCE/SEI:2006).

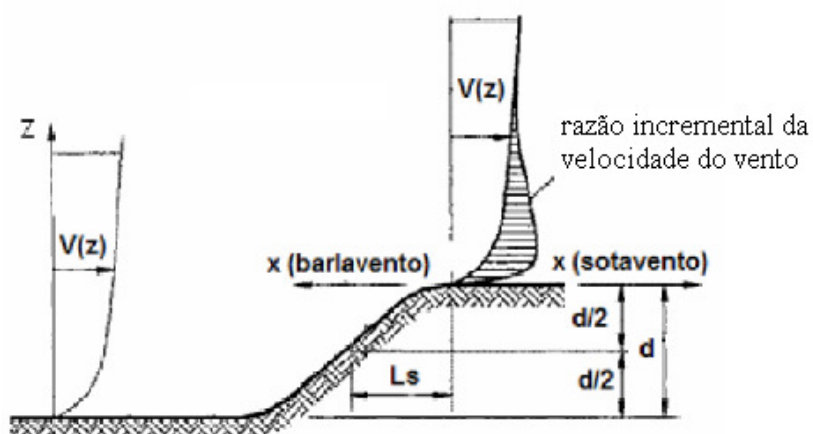


Tabela 21 – Multiplicador topográfico para exposição do tipo C (ASCE/SEI 7-05: 2005).

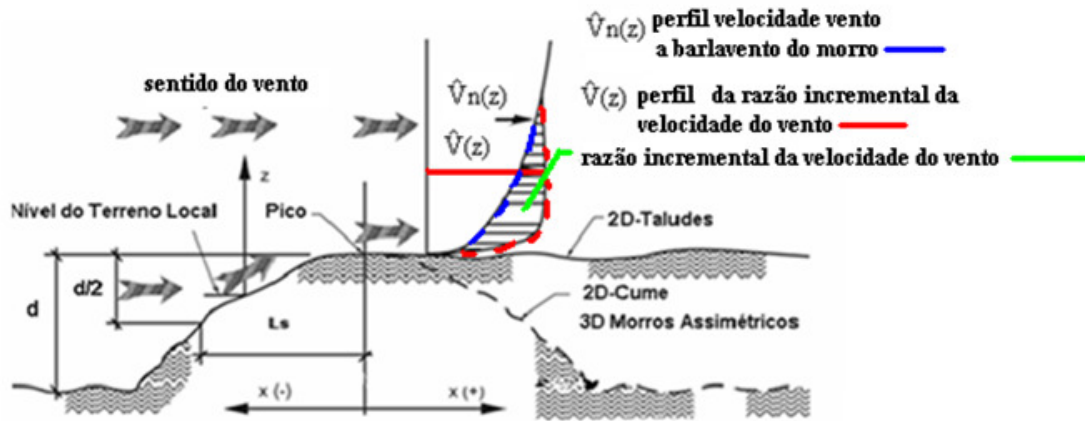
Tabela 21 Multiplicadores topográficos para exposição do tipo C em conformidade com a simbologia adotada nas Figuras 42 e 43.

Multiplicador topográfico para exposição do tipo C										
d/L_s	Multiplicador K₁			x/L_s	Multiplicador K₂		z/L_s	Multiplicador K₃		
	2D cume	2D talude	3D morro assimétrico		2D talude	todos outros casos		2D cume	2D talude	3D morro assimétrico
0,20	0,29	0,17	0,21	0,0	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00
0,25	0,36	0,21	0,26	0,50	0,88	0,67	0,10	0,74	0,78	0,67
0,30	0,43	0,26	0,32	1,00	0,75	0,33	0,20	0,55	0,61	0,45
0,35	0,51	0,30	0,37	1,50	0,63	0,00	0,30	0,41	0,47	0,30
0,40	0,58	0,34	0,42	2,00	0,50	0,00	0,40	0,30	0,37	0,20
0,45	0,65	0,38	0,47	2,50	0,38	0,00	0,50	0,22	0,29	0,14
0,50	0,72	0,43	0,53	3,00	0,25	0,00	0,60	0,17	0,22	0,09
				3,50	0,13	0,00	0,70	0,12	0,17	0,06
				4,00	0,00	0,00	0,80	0,09	0,14	0,04
							0,90	0,07	0,11	0,03
							1,00	0,05	0,08	0,02
							1,50	0,01	0,02	0,00
							2,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: (NGO e LETCHFORD, 2008).

A simbologia do aspecto topográfico considerado pela ASCE/SEI 7-05 é retratado na Figura 44.

Figura 44 – Simbologia do aspecto topográfico considerado na ASCE/ SEI 7-05 (NGO e LETCHFORD, 2008).



A Tabela 22 consolida os parâmetros da velocidade incremental do vento considerados na ASCE/ SEI 7-05, em correspondência à Figura 44.

Tabela 22 - Parâmetros de cálculo da velocidade incremental do vento sobre as características topográficas (ASCE/SEI 7-05: 2005).

Perfil do Morro	$k_1/(d/L_s)$			γ	μ	
	Exposição				à montante do morro	à jusante do morro
	B	C	D			
Cumes bidimensionais (ou vales com altura-d negativa em $K_1/(d/L_s)$)	1,30	1,45	1,55	3	1,5	1,5
Taludes bidimensionais	0,75	0,85	0,95	2,5	1,5	4
Morros assimétricos tridimensionais	0,95	1,05	1,15	4	1,5	1,5

Fonte: (NGO e LETCHFORD, 2008).

4.2.9 National Building Code of Canada- NBCC

A NBCC, (2005) define três tipos de abordagens para a definição dos efeitos do vento.

A primeira, denominada procedimento simples é empregada na maioria das aplicações de carregamento do vento, incluindo estruturas e revestimentos em edificações de baixo e médio porte. Nesse caso, a estrutura é admitida como relativamente rígida, ou seja, as ações

dinâmicas do vento podem ser resolvidas a partir da carga estática equivalente, desconsiderando a resposta dinâmica da estrutura.

O procedimento detalhado para o cálculo empírico das cargas de vento deve ser considerado sempre que a edificação for suscetível a cargas dinâmicas, tais como vibrações induzidas pelo vento. Esse procedimento consiste em cálculos que envolvem:

- a) intensidade da turbulência do vento para o local como uma função da altura e da rugosidade do entorno;
- b) propriedades da edificação, tais como altura, largura; frequência natural da vibração e amortecimento.

Testes em túnel de vento são especialmente apropriados quando uma definição mais exata da resposta dinâmica é necessária, de modo a determinar os coeficientes de pressão exterior para projetos de edificações que fogem da forma comum. O produto final dos cálculos é o fator de efeito de rajada - C_g .

4.2.9.1 Velocidade Média do Vento

A NBCC (2005) considera para velocidade de referência a média da velocidade horária a 10 m acima solo em terreno plano e aberto. A norma em análise associa valores da pressão de referência do vento para três probabilidades anuais de ocorrência, 0,01, 0,033 e 0,1, para um dado número de localizações geográficas.

4.2.9.2 Metodologia

4.2.9.2.1 Cargas Devidas ao Vento

4.2.9.2.1.1 Carregamento Especificado de Vento

A sobre-pressão externa ou sucção especificada devida ao vento, em parte ou toda a superfície de uma edificação, é calculada na forma da equação 87.

$$p^* = q C_e C_g C_p \quad \text{equação 87}$$

Onde:

p^* - pressão externa especificada atuando estaticamente na direção normal à superfície, tanto como sobre-pressão quanto como sucção. É a pressão estática de projeto. Considera os parâmetros a seguir relacionados.

q - pressão da velocidade de referência;

C_e - fator de exposição;

C_g - fator efeito de rajada;

C_p - coeficiente de pressão externa, medida sobre a área da superfície considerada.

As cargas de vento para uma edificação como um todo deve ser a diferença algébrica das cargas a barlavento e a sotavento da superfície considerada. Em alguns casos pode ser calculada como produto das sobre-pressões externas ou sucções e as áreas da superfície sobre a qual elas são medidas, conforme equação 88.

$$q(\text{kPa}) = C V^2 \quad \text{equação 88}$$

Onde:

q - pressão referência do vento;

C - depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar e tem o valor que segue:

$$\begin{aligned} &\text{se } V \text{ em Km/h, } C=50 \times 10^{-6}; \\ &\text{se } V \text{ em m/s, } C=650 \times 10^{-6}. \end{aligned}$$

O valor das pressões devidas ao vento em parte ou toda a estrutura de uma edificação deve ser a diferença algébrica da sobrepressão externa ou sucção devido ao vento calculada na forma da equação 83 e a pressão interna devida ao vento calculada na forma da equação 89.

$$p_i = q C_e C_g C_{pi} \quad \text{equação 89}$$

Onde:

p_i - pressão interna específica atuando estaticamente e na direção normal à superfície, tanto como sobre-pressão como a sucção;

q - pressão da velocidade de referência;

C_e - fator de exposição;

C_{p_i} - coeficiente de pressão interna;

O valor da pressão da velocidade de referência - q , deve atender às seguintes condições:

a) projeto de revestimento: o valor adotado deve estar baseado na probabilidade deste ser excedido em um ano, em um período médio de recorrência de 10 anos;

b) projeto de partes estruturais sujeitas à deflexão e à vibração: o valor adotado deve estar baseado na probabilidade deste ser excedido em qualquer tempo, em um período médio de recorrência de 10 anos;

c) para todos os edifícios, exceto aqueles listados na cláusula d, a pressão da velocidade de referência - q para o projeto das peças estruturais, deve ser baseada na probabilidade de o valor adotado exceder em qualquer tempo, em um período médio de recorrência de 30 anos;

d) a pressão da velocidade de referência - q para projeto estrutural das peças para prédios *pós-disaster* deve ser baseada na probabilidade de que o valor adotado se exceda em qualquer tempo, no período de 01 ano, de 01 em 100 anos.

4.2.9.2.1.2 Fator de Exposição C_e .

4.2.9.2.1.2.1 Procedimento Simplificado:

a) O fator de exposição reflete mudanças na velocidade e na altura do vento, também os efeitos das variações do terreno do entorno e topografia. Morros podem amplificar a velocidade do vento próximo ao solo aumentando o fator de exposição. Valores representativos tanto para o procedimento simples como o detalhado são apresentados na Tabela 23 relacionados a altura de referência;

b) C_e é baseado na lei da potência de 1/5, a qual é apropriada para rajadas de vento sobre 3 a 5 s, em terreno aberto (lei da potência 1/10). Representa uma “parcela do vento” que será simulado.

Tabela 23 – Fatores de exposição C_e (NBCC (2005)).

Altura (m)	Fator de exposição
Acima 0 a 6	0,9
Acima 6 a 12	1,0
Acima 12 a 20	1,1
Acima 20 a 30	1,2
Acima 30 a 44	1,3
Acima 44 a 64	1,4
Acima 64 a 85	1,5
Acima 85 a 140	1,6
Acima 140 a 240	1,8
Acima 240 a 400	2,0

4.2.9.2.1.2.2 Procedimento Detalhado

Em um procedimento detalhado, o fator de exposição C_e é baseado no perfil de velocidade média, o qual varia consideravelmente de acordo com a rugosidade do terreno sobre o qual o vento está soprando antes de alcançar a edificação. A dependência do terreno é mais significativa do que é o caso para o perfil da velocidade de rajada (variação da rajada com a altura) e três categorias de exposição são definidas. O fator de exposição em terreno plano - $C_e(z)$ - é dado pelas equações 90, 91 e 92.

- a) Exposição A: (aberta ou padrão): para terrenos abertos com edificações, árvores ou outras obstruções espalhadas ou mares e lagoas. Atende à equação 90.

$$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0,28}, C_e \geq 1,0 \quad \text{equação 90}$$

- b) Exposição B: para áreas urbanas ou suburbanas, terrenos arborizados, florestas ou centros das grandes cidades. Atende à equação 91.

$$C_e = 0,5 \left(\frac{z}{12,7}\right)^{0,50}, C_e \geq 0,5 \quad \text{equação 91}$$

- c) Exposição C: para centros de grandes cidades com grandes concentrações de altos edifícios com pelo menos 50% das construções não excedendo 04 andares. Atende à equação 92.

$$C_e = 0,4 \left(\frac{z}{30} \right)^{0,72}, C_e \geq 0,4 \quad \text{equação 92}$$

Obs: A exposição B ou C não deve ser empregada a não ser que a rugosidade do terreno persista a barlavento, por, no mínimo 1,5 km, sendo o fator de exposição variado de acordo com o terreno, caso a rugosidade difira de uma região para outra.

4.2.9.2.1.3 Fator Efeito de Rajada C_g

O coeficiente em tela deverá obedecer aos quesitos que seguem:

- a) 1,0 ou 2,0 para pressões internas, de acordo com o apropriado;
- b) 2,0 para edificações como um todo e partes estruturais principais;
- c) 2,5 para pequenos elementos estruturais;
- d) se uma abordagem dinâmica para a ação da rajada de vento é usada, o valor apropriado depende tanto da turbulência do vento quanto do tamanho e frequência natural da estrutura.

4.2.9.2.1.4 Efeitos Dinâmicos do Vento

A NBCC (2005) referenda que para aqueles prédios cuja altura for maior do que 4 (quatro) vezes sua largura efetiva mínima, ou maior que 120 m e demais edificações cujo pouco peso, baixa frequência e baixo amortecimento os tornam suscetíveis à vibração, os projetos devem atender ao que segue:

- a) considerar o risco da sobrecarga, vibração e os efeitos da fadiga, ou;
- b) projetar empregando uma abordagem dinâmica para a ação de rajadas de vento.

4.2.9.2.1.5 Cargas Totais e Parciais

Segundo a mesma norma, prédios e partes estruturais devem ser capazes de resistir aos efeitos a seguir listados:

- a) cargas de vento plenas atuando ao longo de cada um dos dois eixos principais, considerados separadamente;
- b) cargas de vento como descritas no item “a”, mas com 25% da carga removida de qualquer porção da área;
- c) cargas de vento como descritas no item “a”, mas consideradas simultaneamente com 75% de seus valores totais, e;
- d) cargas de vento como descritas em “c”, mas com 25% dessas cargas removidas de qualquer porção da área.

4.2.9.2.1.6 Velocidade incremental do vento sobre Morros e Taludes

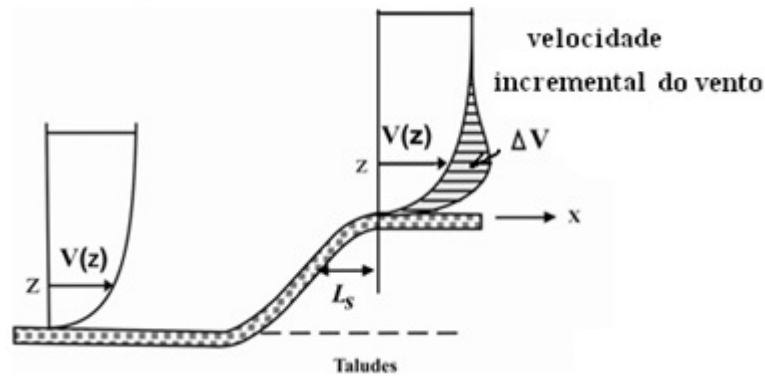
Edificações em morros (com inclinação > 1 em 10) particularmente próximas ao cume podem estar sujeitas a um significativo aumento da velocidade do vento, em relação a prédios situados no nível do solo. O fator de exposição C_e em uma altura “z” acima do nível do solo é então igual ao fator de exposição em um terreno plano multiplicado pelo fator $(1 + \Delta V(z))^2$ onde:

$\Delta V(z)$ - velocidade incremental do vento .

Esta rotina é válida tanto para procedimento simples como detalhado. Este efeito é ilustrado nas Figuras 45 e 46.

Figura 45 - Velocidade incremental do vento sobre morros (NBCC, 2005)

. Figura 46 - Velocidade incremental do vento sobre taludes (NBCC, 2005).



Perto do cume das Figuras 45 e 46 e dentro de uma distância $|x| < kL$, o fator de exposição modificado de acordo com a equação 93.

$$C_e^* = C_e(z) \left\{ 1 + \Delta V_{\text{máx}} \left(1 - \frac{|x|}{kL_s} e^{(-p^{**} z/L)} \right) \right\}^2 \quad \text{equação 93}$$

Onde:

C_e^* - fator de exposição modificado para emprego em morros ou taludes;

$\Delta V_{\text{máx}}$ - velocidade incremental do vento;

p^{**} - coeficiente de redução da velocidade incremental com a altura;

$|x|$ - módulo do comprimento horizontal;

k - parâmetro de cálculo da máxima velocidade incremental do vento sobre morros

L_s - distância horizontal a partir do cume ao ponto a barlavento onde a altura da elevação é $d/2$.

Os valores de p^{**} e $\Delta V_{\text{máx}}$ dependem da forma e da inclinação do morro.

Valores representativos desses parâmetros são dados na Tabela 24.

Tabela 24 – Parâmetros para máxima velocidade incremental do vento sobre baixos morros (NBCC, 2005).

Parâmetros para máxima velocidade incremental do vento sobre baixos morros				
Forma do Morro	$\Delta V_{\text{máx}}$	p^{**}	k	
			x<0	x>0
Cumes bidimensionais ou vales com "d" negativo	2,2 d/L	3	1,5	1,5
Taludes bidimensionais	1,3 d/L	2,5	1,5	4
Morros assimétricos tridimensionais	1,6 d/L	4	1,5	1,5

Fonte: (NBCC, 2005).

Onde:

d - altura da colina;

L_s - distância entre um eixo que passa no cume e a meia-altura a barlavento da colina;

p^{**} - coeficiente de redução da velocidade incremental do vento com a altura.

Nota: Para $d/L_s > 0,5$ assume-se que $d/L_s = 0,5$ e substitui-se $2d$ por L_s na equação 92.

O declive máximo da colina é $d/2L_s$ para morros de formas arredondadas. As expressões admitem que o vento se aproxime do morro ao longo da inclinação máxima, de modo a considerar-se a maior velocidade incremental do vento próximo ao cume.

As equações sugerem que colinas com declives menores que 1/10 são pouco prováveis de produzir velocidade incremental do vento significativa.

4.3 COMPARAÇÕES ENTRE AS NORMAS

4.3.1 Introdução

O desenvolvimento de modelos empíricos para a identificação de parâmetros que caracterizam um escoamento constitui-se em um conceito relativamente recente (os modelos nesta pesquisa analisados datam aproximadamente dos anos 70).

Basicamente, as normas de vento definem a velocidade de projeto do vento através do produto da velocidade básica do vento adicionado aos fatores que consideram a localização geográfica, efeitos topográficos e rugosidade superficial, principalmente. Os métodos adotados pelas

normas examinadas empregam parâmetros multiplicadores para traduzir os efeitos topográficos na formulação empírica.

Os valores dos parâmetros obtidos a partir de medições em túnel de vento são comparados com os valores recomendados nos códigos e padrões internacionais. Com a grande aplicação prática dos padrões, a tendência que se espera é o crescimento e a convergência gradual no que se refere aos conceitos adotados nos modelos de carga de vento a exemplo dos já consolidados modelo Europeu e do modelo Australiano, aplicado para Austrália e Nova Zelândia. A literatura mostra uma discrepância entre os valores recomendados por tais referenciais, de modo que a tendência é harmonizar os critérios que definem tais parâmetros (HOLMES; BAKER; TAMURA, 2005).

4.3.2 Estudo Comparativo entre as Normas Citadas

O estudo desenvolveu uma comparação entre os conceitos básicos constantes nas normas de vento referenciadas considerando-se condições similares de um escoamento e metodologias específicas adotadas em cada uma.

A velocidade básica do vento na maioria das normas é baseada na medição do vento a 10 m altura em um terreno aberto associado com diferentes médias de intervalos de recorrência e tempos médios. A velocidade básica do vento é convertida em velocidade de referência do vento ou de projeto para uma área específica, associada com uma faixa média de tempo de recorrência multiplicada por fatores de locação geográfica, efeitos topográficos e de rugosidade da superfície (KIJEWSKI e KAREEM, 1998).

É também observado que enquanto todos os padrões adotam como referência para a velocidade 10 m acima de solo plano, em uma exposição aberta, cada um usa intervalos de diferentes durações, conforme verificado na Tabela 25. A citada Tabela apresenta um estudo comparativo da velocidade básica do vento para as normas elencadas nesse estudo.

Tabela 25 - Comparação das velocidades básicas do vento nas normas em questão.

Norma	Velocidade básica do vento	Período de Retorno (anos)
NBR	velocidade de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, sobre um plano e aberto terreno.	50
AIJ:2004	velocidade média de 10 min, excedida uma vez em 100 anos, a 10 m acima do terreno, sobre um terreno plano e aberto.	100
AS/NSZ 1170.2:2002	velocidade média regional-3s em m/s, a 10 m acima solo em terreno aberto - categoria 2	500
CEN TC 250:2002	velocidade média de 10 min, a 10 m acima do solo 10, sobre mar ou terreno aberto definido como categoria II, com probabilidade de exceder 0,02.	50
ASCE/SEI 7-05:2005	velocidade de rajada de 3s, a 10m acima solo, sobre um terreno da categoria "C".	50
NBCC	velocidade média horária, a 10 m acima do solo, sobre mar ou terreno aberto.	10-revestimentos; 30-elementos estruturais; 100-pos-disaster

Fonte: NBR 6123(1987), AIJ, 2004; AS/NSZ 1170.2:2002; CEN TC 250:2002; AS/SEI7-05:2005; NBCC (2005).

Como resultado da análise da Tabela 25, conclui-se o necessário estabelecimento de um correto ajuste na velocidade de referência para uma adequada comparação entre as normas.

Com relação ao perfil de velocidade média, as normas AS/NSZ 1170.2:2002 e a CEN TC 250:2002 empregam o perfil logarítmico. Todas as demais adotam perfil em lei de potência.

No que se refere aos tipos de exposições consideradas, os padrões analisados variam de 3 a 5 categorias: a NBR 6123, o ASCE/SEI 7-05:2005, o AS/NSZ 1170.2:2002 e CEN TC 250:2002 adotam quatro tipos de exposição, o AIJ:2004 adota cinco e a NBCC (2005) adota três. É importante considerar que na interpretação do ambiente que estará conexo com a exposição a este atribuída existe um nível de subjetividade na aplicação da norma para efetivar o cálculo da carga de vento.

Stathopoulos, Zisis e Wang (1990) estabelece, na Tabela 26, uma comparação entre os valores considerados para os comprimentos de rugosidade entre o ASCE (2005), AS/NZS 1170.2:2002 e NBCC (2005) atestando as diferentes considerações adotadas entre as normas de carga do vento relacionadas.

Tabela 26 – Parâmetros para máxima velocidade incremental do vento sobre baixos morros.

classe do Terreno	comprimento rugosidade	normas		
		ASCE 7-05	AS/NZS 1170.2:2002	NBCC:2005
plano	z_0	0,005	0,002	Em termos de " α "
aberto	z_0	0,02	0,02	Em termos de " α "
suburbano/urbano	z_0	0,3	0,2	Em termos de " α "
grandes cidades - centros	z_0	-	2	-

Fonte: (STATHOPOULOS; ZISIS; WANG, 1990).

Em uma comparação ampla, pode-se dizer que o ASCE/SEI diferentemente dos demais códigos considera a influência da rugosidade do terreno e das próprias características do terreno, tais como morros isolados, cumes ou taludes. Por outro lado, pode-se dizer que os demais códigos não incluem estas características para os efeitos do cálculo da velocidade incremental do vento. Ao contrário, os códigos ASCE/SEI 7-05, AS/NZS 1170.2 e CEN TC 250: 2002 tratam morros e cumes identicamente.

A Tabela 27 apresenta as inclinações mínimas para a identificação dos efeitos da velocidade incremental do vento e as inclinações limites máximas para a formação das zonas de separação. Essa tabela mostra que os limites apresentam-se bem diferentes entre a maioria dos códigos de carga de vento analisados (NGO e LETCHFORD, 2008). Não apenas existem grandes diferenças nas inclinações limites, mas também a região de aplicação do multiplicador topográfico, ou seja, a zona efetivamente considerada para os efeitos da topografia sobre o escoamento.

O AIJ: 2004 define como inclinação mínima para o efeito da velocidade incremental do vento devida ao efeito topográfico, 13,2%, sendo este o maior valor mínimo dentre os códigos analisados na Tabela 27. Observa-se que o AIJ: 2004 superestima os valores para os dois

limites, sendo, por exemplo, o limite superior significativamente maior que seu correspondente no ASCE/SEI.

Tabela 27 - Variação dos limites de inclinação entre normas.

	ASCE/SEI 7	AS/NZS 1170.2	AIJ:2004	CENTC 250
Limite inferior (%)	10	5	13,2	5
Limite superior (%)	25	45	173,2	30

Na Tabela 28, Ngo e Letchford (2008) analisam a variação da região de influência para efeitos da velocidade incremental do vento em cumes e taludes para as normas ASCE/SEI 7-05, AS/NZS 1170.2, AIJ: 2004, CEN TC 250. A tabela é apresentada em função do parâmetro altura da elevação "d".

De acordo com a Tabela 28, verifica-se que a região de aplicação dos efeitos da velocidade incremental e as inclinações limite permanecem controversas entre as normas analisadas.

O CEN TC 250:2002 é a única norma dentre as analisadas onde o comprimento L_d a barlavento de cumes é considerado em função da velocidade incremental do vento. As demais normas não consideram a inclinação a sotavento na estimativa dos efeitos da velocidade incremental do vento sobre cumes. Efeitos da velocidade crescente em áreas a barlavento de taludes, morros e cumes são idênticos na AS/NSZ 1170 (2005) e CEN TC 250 (2002), enquanto os efeitos de taludes e cumes são diferentes no ASCE/SEI 7-05 e AIJ:2004 (NGO e LETCHFORD, 2008).

Tabela 28 – Região de aplicação dos efeitos da velocidade incremental do vento.

	cumes de morros				taludes			
	barlavento	sotavento	barlavento	sotavento	barlavento	sotavento	barlavento	sotavento
ASCE/SEI 7-05	2d (1,0 L _h)	2,0d (4,0)	2,0d (1,0)	8,0 d	2,0d (1,0 L _h)	2,0d (1,0 L _h)	2,0d (1,0 L _h)	2,0d (1,0 L _h)
AS/NZS 1170.2	1,6d (1,4 L _h)	4,0 d	1,6 d	4,0 d	1,6 d (1,4 L _h)	1,6 d (1,4 L _h)	1,6 d	1,6 d
AIJ:2004	4,0d	8,0d	4,0 d	8,0 d	4,0d	8,0d	4,0d	8,0 d
CEN TC 250	1,7d (1,0 L _h)	5d (3,0 L _h)	1,7 d	5,0 d	1,7d (1,0 L _h)	1,7d (0,5 L _d)	1,7d	1,6 d

onde:

d - altura da característica topográfica;

L_h - metade do comprimento horizontal da inclinação a barlavento para CEN TC 250 e a distância horizontal a partir da crista até o ponto a barlavento onde a altura da característica topográfica é igual a d/2 para os demais códigos.

L_d - comprimento horizontal da inclinação a sotavento

5 TÉCNICA EXPERIMENTAL: ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

5.1 INTRODUÇÃO

O túnel de vento constitui-se em uma ferramenta que possibilita a reprodução dos ventos atmosféricos, através da construção da C.L.A., objetivando a investigação dos efeitos geofísicos, advindos da transitoriedade de um escoamento sobre e no entorno de um modelo reduzido, acrescido ou não de alterações topográficas do entorno, através da identificação das principais variáveis da modelagem do mesmo: obtenção do perfil de velocidades médias do vento, a intensidade e escala integral da turbulência e o espectro da potência, correspondentes à região analisada.

Testes em túnel de vento consideram a geometria do edificação, condições climáticas locais, detalhes do entorno, o que permite condições mais aproximadas para identificação das cargas do vento em estruturas e revestimentos em uma edificação, do mesmo modo que também incluem as alterações do escoamento pela topografia para projetos eólicos e processos de análise de dispersão de poluentes e transporte de calor.

Os túneis de vento podem ser de dois tipos: circuito fechado (escoamento circulando em tubos em forma de anel) ou aberto (escoamento absorvido em um extremo e descarregado em outro). O primeiro tipo proporciona um escoamento livre de perturbações externas, o segundo apresenta a vantagem de exigir menor custo de construção e um menor espaço de laboratório para o comprimento da secção de ensaio do mesmo.

Além disso, os túneis também podem ter estratificação térmica, por meio do aquecimento de uma placa na sua parte inferior. Dentre os estudos que têm sido realizados com a utilização do túnel de vento, citam-se as análises do vento atmosférico, investigações de campo de dispersão de poluentes em torno de alguns obstáculos, além de simulações em regiões com topografia complexa para analisar o escoamento e a turbulência sobre morros com variadas rugosidades superficiais.

Para investigação da alteração do escoamento devido a topografia, arranjos topográficos típicos, tais como cumes de morros e vales com alturas, com larguras e comprimentos traduzidos em modelos reduzidos, representativos do terreno natural, colocados no interior do túnel, em mesas de trabalho para o desenvolvimento dos ensaios. A análise do escoamento

sobre os modelos topográficos agregada aos dispositivos de simulação do entorno (TAKAHASHI et al., 2002), objetiva a reprodução das características físicas constantes no escoamento do campo de testes simulado. As análises de medida coletadas da um ensaio experimental de simulação da CLA em túnel de vento incluem: (a) perfil vertical das velocidades médias, velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica), (b) intensidade da componente longitudinal da turbulência (I_1) e (c) espectro de potência. Estas informações permitem avaliar o comportamento da turbulência, a identificação da razão de velocidade incremental do vento e a região de recirculação, a sotavento do morro (TAKAHASHI et al., 2002). O experimento é conduzido sob condições neutras empregando um equipamento denominado anemômetro de fio quente, o qual pode ser de temperatura constante ou variável.

A Tabela 29 demonstra uma comparação das distribuições de rugosidade empregadas por vários autores para simular o perfil da camada limite (FARELL et al., 1999).

Tabela 29 - Comparação entre as configurações dos elementos de rugosidade empregados em vários autores.

Autor	α	Tamanho do elemento de rugosidade (mm)	λ (%)	λ_f (%) = A_f/A_p	z_d (mm)	z_o (mm)	z_o/k	z_o/H	μ^*/U_δ	f/δ
Yee-Tak Ng	0,27	50,8x101,6x101,6	4,2	8,47	-	2,12	0,021	1,95	0,055	-
Counihan	0,28	15,9x15,9x9,5	15	9,96	1,6	0,75	0,078	5,00	0,055	4,5
Robins	0,20	20x20x20	25	12,90	20	4,40	-	2,20	0,065	10
Lee	0,28	75x75x37,5	33,3	16,7	10	3,00	0,083	3,33	-	5,1
Reinhold et al.	0,28	102x102x102	11,37	11,37	-	-	-	-	0,061	6,1
Atkins and Cermak	0,26	25x25x25	11,11	11,11	-	2,79	0,12	2,2	0,052	11,5
Farell	0,28	28x28x28	7,84	7,84	7	2,40	0,086	2,0	0,057	10,0

Onde:

α - expoente da lei potencial;

λ (%) - densidade de area rugosa;

λ (%) = A_f/A_p - razão dos elementos de rugosidade da área frontal por área plana;

z_d - deslocamento plano zero;

z_0 - comprimento de rugosidade;
 H - altura da agulha
 μ^*/U_δ - razão da velocidade de cisalhamento
 f - fetch

5.2 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

5.2.1 Histórico

Os primeiros ensaios para a determinação das forças do vento sobre estruturas datam de 1891 a 1894, efetuados por Kernot e Mann (1742) na Universidade de Melbourne, Austrália.

A tendência inicial da tecnologia dos túneis foi atender a indústria aeronáutica. Eram ambientes experimentais físicos que tinham uma relação comprimento/altura da câmara de ensaios em torno de dois. O fluxo de ar era suave e uniforme, característica diferente do vento natural, o qual apresenta variações de velocidade com a altura, além da turbulência e rajadas. Estes túneis são denominados aerodinâmicos. Nestes túneis iniciaram-se as medições do vento em modelos em escala com fins estruturais. Entretanto, para obter simulações mais fiéis das características do vento natural, para construção civil iniciaram-se as construções dos túneis de vento para atender a aferição dos esforços em estruturas. Esses túneis tem uma relação comprimento/altura da câmara a partir de oito (BLESSMAN, 1980).

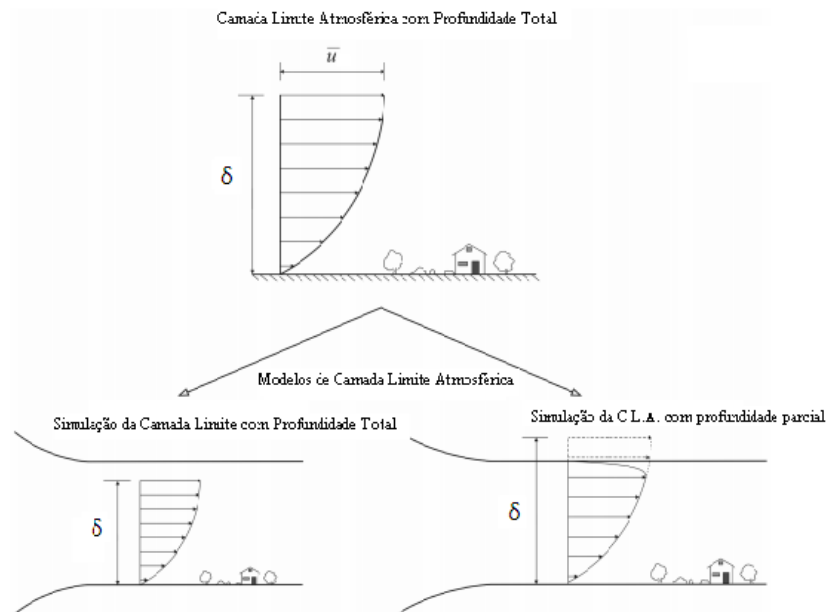
Em 1963, Jensen e Frank mostraram que era possível obter uma escala apropriada da estrutura do vento natural cobrindo-se um comprimento considerável do piso de um túnel de vento com material de rugosidade correspondente ao do terreno simulado (BLESSMANN, 1995). Em 1965, Alan G. Davenport subsidiado por estudos de Jensen e Frank, construiu o primeiro túnel aerodinâmico de camada limite na Universidade de Western, Ontário, Canadá (DAVENPORT e ISYUMOV, 1967).

Os trabalhos de Counihan (1969), Ligrani et al. (1979, 1983) e Robins (1979) investigaram a possibilidade de obtenção de uma fina camada limite com características similares à camada atmosférica, através da disposição de corpos geometricamente diferenciados no início da câmara de ensaios ou disseminados no piso da seção principal de ensaios de um túnel de vento. O escoamento está especialmente sujeito a esses elementos através e no entorno dos mesmos (MARUYAMA e ISHIZAKI, 1988). Cook (1972) demonstrou que dispositivos tais

como torres, geradores de vórtices e cercas na entrada da secção de regulação do escoamento podem gerar camadas limites turbulentas em seções de teste mais curtas do túnel. Nesta mesma época, Blessmann (1982) atestou que a reprodução das características do vento em túnel também podia ser obtida através de jatos lançados perpendicularmente ao vento gerado no túnel, a partir do piso. Outros importantes experimentos na construção do método de simulação da camada limite em túnel de vento foram concluídos por Irwin (1981) e Gartshore e De Croos (1976).

As técnicas de simulação da camada limite de um escoamento por meio de medições em modelos de pequena escala em túneis de vento desenvolveram-se em duas aberturas metodológicas da pesquisa: a primeira considerou altura ou profundidade total da C.L.A. e outra apenas a região mais próxima da superfície da terra, com altura ou profundidade parcial da C.L.A. No primeiro caso, simulações de profundidade total permitem reproduzir fisicamente em túnel de vento a profundidade total da C.L.A. São comumente empregadas em estudos de cargas de vento de estruturas altas e dispersão de poluentes do ar. Entretanto, em simulações de profundidade total não são precisamente reproduzidos detalhes de pequena escala das características do vento. Se o caso em análise for a estrutura e o entorno do morro, a simulação de profundidade parcial é geralmente aplicada. Este caso, com reprodução apenas a porção baixa da C.L.A, aumenta a resolução para o escoamento onde encontram-se os fatores mais representativos pela alteração do escoamento: orografia e rugosidade, evaporação, evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes ao redor de morros ou estruturas. Simulações da C.L.A. com profundidade total ou parcial são mostradas na Figura 47 (KOZMAR, 2011).

Figura 47- Simulação da C.L.A. em túnel de vento com profundidade total e parcial (KOZMAR, 2011).



Entre 1980 e 1995 foram construídos os túneis de vento da camada limite que representaram os avanços mais significativos da pesquisa neste segmento. Os mais notáveis foram as instalações da Universidade de Western Ontario, da Universidade Monash e do Instituto de Pesquisas Tsukubu, Japão.

Investigações em túneis de vento para aplicações na engenharia do vento foram discutidas, principalmente, em publicações que incluem Scruton (1960); Cermak (1958) e (1975); Whitbread (1975); Reinhold (1982); Steckley et al. (1991); Simiu e Scanlan (1996); Holmes, (2001); Holmes et al. (2003,2005); Xie e Gu (2004) e Li et al. (2006), ESDU(2012).

5.2.2 Técnicas de Simulação

Para que os resultados das medições em ambiente experimental reproduzam mais próximo as condições existentes no ambiente natural, passamos a examinar as condições de semelhanças que devem ser atendidas entre o ambiente natural e o experimental:

1. Semelhança geométrica: semelhança de detalhes e rugosidades das superfícies em análise;
2. Semelhança cinemática: ou seja, do escoamento. A distribuição das velocidades médias e das características da turbulência devem ser análogas entre os dois ambientes.

3. Semelhança dinâmica: ou seja, de forças incidindo sobre o corpo. As forças de pressão, de viscosidade e de inércia devem ser proporcionais.

Em um escoamento natural, tem-se as forças de gravidade, viscosidade, inércia e pressão. Para a situação experimental, as forças de gravidade não são consideradas, em função do desprezível peso do volume do ar.

A camada limite em túnel de vento tende a ser turbulenta como é a camada limite atmosférica. Esta situação é obtida pela rugosidade da superfície, de tal modo que o número de Reynolds seja maior, que 2,5. O perfil da velocidade do vento em túnel deve ser descrito pela lei da potência. A equação 94 apresenta a relação entre a velocidade média $V(z)$ em uma altura z : (STRATARIDAKIS; WHITE; GREIS, 1998) .

$$\frac{V(z)}{V_{\infty}} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad \text{equação 94}$$

Onde:

δ - altura da camada limite;

V_{∞} - velocidade não perturbada na altura δ ;

α - expoente da lei potencial

Com o intuito de obtermos resultados cada vez mais fiéis ao escoamento natural desenvolveram-se várias técnicas de simulação das características dos ventos naturais em um ambiente experimental.

Atualmente, as técnicas empregadas para artificialmente reproduzir a espessura ou profundidade da C.L.A. em um túnel de vento podem ser obtidas a partir de três principais métodos, os quais são agregados para a reprodução do vento natural (BLESSMANN,1972 e 1973; CERMAK,1982 e COOK, 1978):

a) Métodos de Rugosidade: alterações das condições da superfície interna conexas à simulação;

b) Método de Barreira: neste método barreiras, geradores de vórtices e elementos de rugosidade na superfície são aplicados à barlavento da seção de teste de modo a reproduzir a espessura da C.L.A. em túnel de vento (profundidade).

Exemplos (BLESSMANN, 1990):

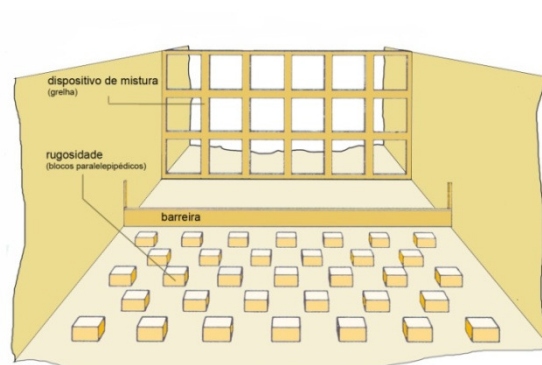
- telas curvas e telas planas: obtenção de perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- grelhas de barras horizontais de seção retangular ou circular, variando o espaçamento e/ou a espessura: perfil de velocidades médias e turbulência média;
- grelhas de malha quadrada ou retangular, constituídas de barras de seção retangular: turbulência superposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;
- grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas: perfil da velocidade média e turbulência;
- tela uniforme: turbulência fina superposta a uma corrente de ar uniforme;
- barras finas de seção circular, variando o diâmetro e/ou o espaçamento: perfil da velocidade média e turbulência fina;
- triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados, de lados retos ou curvos: perfil de velocidades médias e turbulência. Exemplo desse obstáculo são os simuladores de Counihan.

Melhores resultados podem ser obtidos pela combinação dos dispositivos supramencionados com blocos disseminados no piso.

A rugosidade constitui-se na componente mais importante, pois ela define três parâmetros da lei logarítmica (z_0 , μ^* e z_d). O elemento barreira constitui-se em um anteparo que atua ao nível do piso e também na altura da camada limite (BLESSMAN, 1973).

Na Figura 48, observa-se a constituição dos elementos típicos que constituem um tipo de experimento em túnel de vento apresentando os elementos de rugosidade, no piso e uma grelha plana ao fundo. Esta última empregada para geração de uma turbulência uniforme. (COOK, 1985).

Figura 48 - Composição de elementos típicos que integram os experimentos em túnel de vento (COOK, 1985).



As Figuras 49 e 50 ilustram alguns dos dispositivos descritos.

Figura 49 - Simuladores elípticos de Counihan(1969) empregados no túnel Prof. Jacek P. Gorecki na Universidad Nacional del Nordeste, na Argentina (Publicação de LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004).

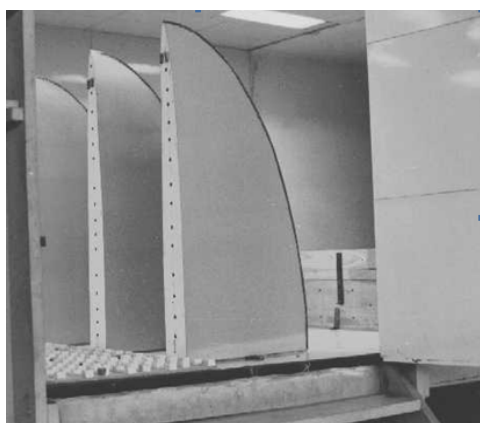
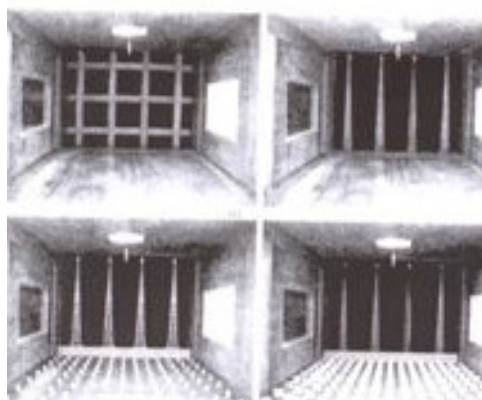


Figura 50 - Simuladores empregados no túnel Prof. Joaquim Blessmann no Laboratório de Aerodinâmica da UFRGS, Porto Alegre, RS. À esquerda-superior, método de barreira, do tipo grelha e os demais agulhas ou spires. Os dois exemplos inferiores são métodos de rugosidade, anteparos horizontais e agulhas.



Os métodos acima têm em comum o fato de empregarem corpos sólidos para a simulação da CLA. Esses dispositivos ocasionam uma diminuição da velocidade média no túnel, a qual pode chegar até a 80% como no caso de grelhas de malha quadrada de elevado índice de área exposta (BLESSMANN, 1973). Jensen e Frank (1963,1965) pioneiros no estudo das características do vento natural já empregavam dispositivos passivos, do tipo tapete e agulhas ou *spires*, na formação da C.L.A. Na mesma década, Davenport, no Canadá e Cermak nos USA desenvolviam estudos similares. As telas uniformes aceleram o processo, entretanto, isoladamente não constroem esta estrutura. A tela grossa sozinha, na experiência do autor, causa a menor intensidade turbulenta, assim como a menor perda de carga, sendo a maior perda de carga causada pelas agulhas ou *spires* seguidas pela tela fina. O processo de simulação da C.L.A. deve ocorrer com a menor perda de carga possível para, em consequência, ser obtido um elevado número de Reynolds no menor espaço possível de túnel.

Na Figura 51 são verificados dois tipos de métodos de simulação da C.L.A.: rugosidade e barreira, empregados concomitantemente no túnel Prof. Blessmann.

Figura 51 - Método de rugosidade e barreira com perfurações projetado pelo Prof. Joaquim Blessmann no túnel de vento da UFRGS (Figura da publicação de LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004).



Dispositivos de Mistura são aqueles que empregam meios aerodinâmicos para a construção da estrutura do vento natural, tais como jatos direcionais lançados perpendicularmente ao escoamento localizados no piso da entrada da seção de trabalho ou por jatos múltiplos direcionais de intensidade variável dirigido em oposição aos demais, localizados em qualquer lado do túnel (BLESSMANN, 1982). Conforme este autor não há redução da velocidade média do vento como ocorre nos demais, mas, sim, um aumento da velocidade devido à quantidade de movimento adicionada à corrente longitudinal. Além disto, este método oferece maior controle das características do vento, dentro de limites definidos, pelos registros que comandam a vazão do ar.

A influência de determinados dispositivos na formação da C.L.A. depende das distâncias e espessuras dos mesmos, tais como o emprego de agulhas, situação em que as dimensões destes elementos são definidos por tentativa e erro (BLESSMAN,1990). Segundo a maioria dos autores referendados no capítulo, as barreiras e os dispositivos de mistura tendem a associar-se, existindo uma interação entre os mesmos. Do mesmo modo que se estabelecem relações entre as distâncias existentes entre os dispositivos e sua influência na formação da C.L.A., a variação dos diferentes espaçamentos de telas e de malhas influenciam a perda de carga no processo de obtenção da C.L.A.

5.2.3 Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

Os ensaios experimentais da presente pesquisa foram realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (BLESSMANN, 1982), mostrado na Figura 52 e 53. Trata-se de um túnel de vento de circuito fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais, traduzidas na formação da C.L.A. A seção de altas velocidades do túnel tem relação comprimento / altura da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões de 1,20 m a 1,30 m x 0,90 m x 9,32 m (largura x altura x comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, é de 45m/s. As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 746.000 Watts e o controle da velocidade do escoamento é feito através de um inversor de frequências. A Figura 52 mostra uma vista externa lateral do túnel.

Figura 52 - Vista externa lateral do túnel Prof. Joaquim Blessmann.



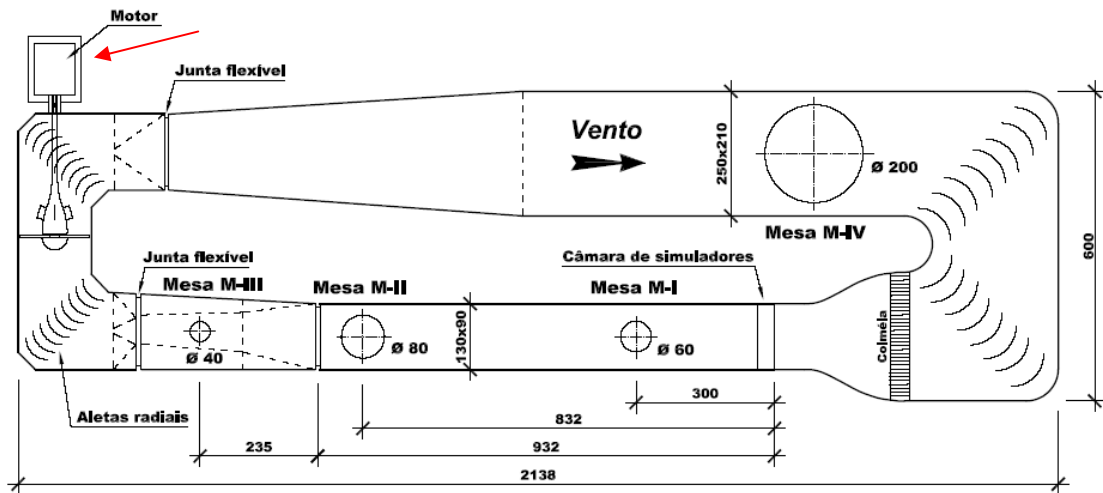
O túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann dispõe atualmente de quatro mesas giratórias para fixação de modelos, cujas posições são mostradas na Figura 53. Cada mesa tem suas aplicações específicas:

- a) Mesa M-I: ensaios de tipo aeronáutico no piso do túnel; pesquisa básica em formas geométricas simples, em modelos bi ou tridimensionais; ensaios para construção civil com geradores de turbulência colocados na câmara de simuladores (na Mesa M-I o modelo pode ser colocado vertical ou horizontalmente);
- b) Mesa M-II: ensaios de tipo aeronáutico no eixo do túnel; ensaios para construção civil, com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores e/ou em outras seções; estudos de fenômenos de instabilidade aerodinâmica com modelos bidimensionais colocados na horizontal;
- c) Mesa M-III: construída especialmente para estudos dinâmicos em estruturas muito alteadas, tais como pilares de viadutos, mastros, torres de televisão e chaminés;
- d) Mesa M-IV: localizada no retorno do túnel, onde a seção transversal mede 2,40 m x 2,10 m. Serve para ensaios de dissipação de fumaça e de gases industriais, influência da topografia dos terrenos sobre os ventos, efeitos de interação, modelos de pontes, entre outros (BLESSMANN,1982).

Os ensaios nos modelos topográficos de escala do presente trabalho foram realizados na Mesa M-II. Nessa mesa é possível trabalhar com o perfil de velocidades desejado, obtido a partir da colocação de um modelo em escala de uma área no piso do túnel com a simulação da rugosidade do terreno.

O túnel de vento de retorno fechado Prof. Joaquim Blessmann, da UFRGS (BLESSMANN, 1982), é apresentado, em planta baixa, na Figura 53. Inicialmente, o motor estava localizado dentro do túnel. Posteriormente, Prof. Loredou-Souza, reposicionando-o conforme mostrado na citada figura.

Figura 53 - Túnel de vento Prof Joaquim Blessman, da UFRGS (BLESSMANN, 1982).

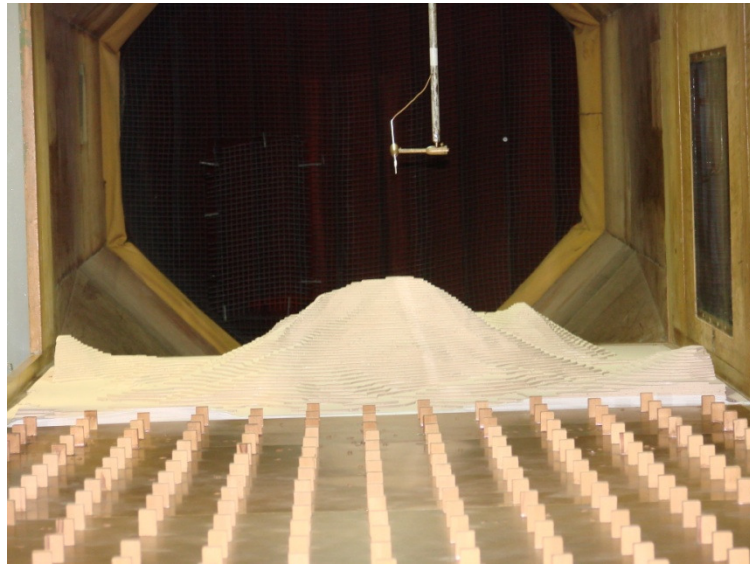


Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann
Dimensões em [cm]

5.2.3.1 Instrumentação

Para a a reprodução de um escoamento de camada limite de estabilidade neutra mais fidedigno ao ambiente natural, sobre e no entorno do modelo de testagem foram empregados elementos de rugosidade e dispositivos de mistura apropriados para coleta das medições do escoamento, de acordo com Blessmann (1982). Conforme figura 54, elementos de rugosidade do tipo tacos de madeira foram empregados no piso do túnel.

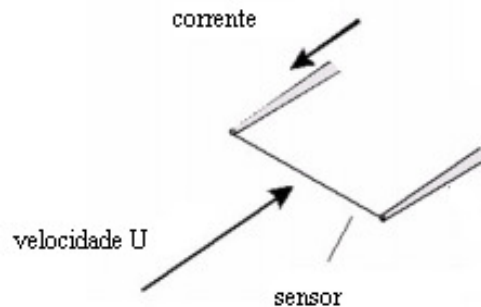
Figura 54 - Medições com o Experimento I - área complexa real.



A medição da velocidade e da turbulência nas locações definidas no modelo de testagem foi feita com o emprego de um anemômetro do tipo fio-quente. Esse equipamento consiste basicamente em um filamento aquecido que fica exposto ao escoamento de um fluido. Constitui-se em um método de investigação pouco intrusivo devido às pequenas dimensões do elemento sensível e se baseia nas trocas de calor entre sensor aquecido e o fluido que pode ser correlacionada à velocidade do fluido. Este tipo de anemômetro possui alta sensibilidade, baixa velocidade de partida e rápido tempo de resposta. Pode ser de fio ou filme quente, conforme relatam Platt e Griffiths (1972); Miller, Shah e Antonia (1987); Pearcy et al. (1989). O filamento fica conectado a um circuito eletrônico que é capaz de monitorar a variação da resistência elétrica estabelecendo uma relação entre a velocidade do escoamento e a resistência do filamento aquecido. O elemento sensível combinado a um circuito eletrônico de controle oferece respostas em elevadas frequências de kHz. Para medição da velocidade, as sondas de anemômetro de temperatura constante normalmente têm sensores de fio de tungstênio, um milímetro de comprimento e 5 mm de diâmetro, montados em duas pontas em forma de agulha com 1, 2 ou 3 fios, sendo que o número de fios corresponde às componentes do vetor velocidade que o sensor é capaz de medir, um fio de tungstênio para cada componente x , y e z da velocidade. A temperatura existente em cada fio antes de ser imerso no fluido se altera em contato com o ar. Como os fios são resistivos e suas resistências variam com a temperatura, o equipamento gera um sinal convertido em diferença de potencial ao passar

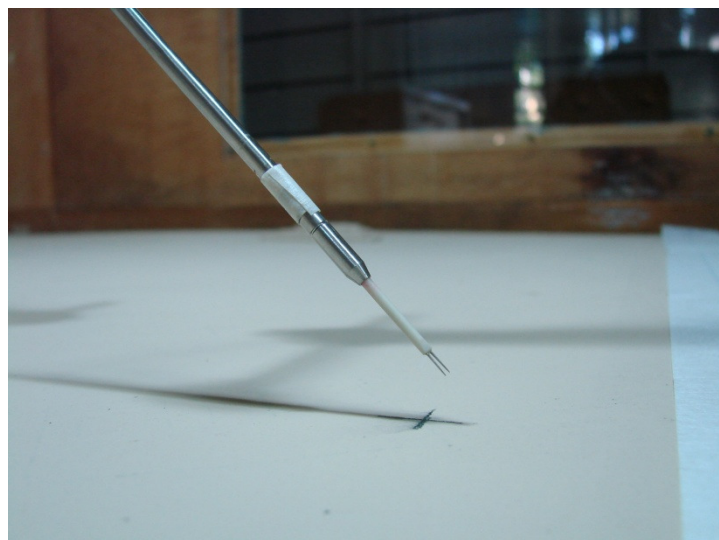
pelo circuito. O esquema de funcionamento do anemômetro de fio quente é mostrado na Figura 55.

Figura 55 – Funcionamento anemômetro de fio quente.



Tipicamente, medições feitas com fio quente próximas ao solo tem uma incerteza menor que 5% de seus verdadeiros valores (CALIFORNIA REGIONAL WIND ENERGY FORECASTING SYSTEM DEVELOPMENT, 2006). A sonda empregada na medição pode ser vista nas Figuras 55 e 56. No caso, foi empregado um sensor correspondente ao anemômetro de fio quente unidirecional empregado para as medidas de velocidade do escoamento. Em cada ponto medido séries temporais contínuas de dados são coletadas e correlações entre as mesmas são estabelecidas.. Exemplos disso são a velocidade média, intensidade de turbulência e espectros de potência (DANTEDYNAMICS, 2011).

Figura 56 - Detalhe da sonda empregada na medição.



5.2.3.2 Vento Simulado

Os ventos simulados para a realização dos ensaios foram deslizante e turbulento. O perfil vertical de velocidades médias emprega a lei de potência, ou seja, variação da velocidade média do vento em uma dada seção do túnel em função da cota z , em conformidade com a equação 95. Esse perfil foi obtido com a colocação de elementos de rugosidade no piso da seção de trabalho, conforme mostrado na Figura 54. A turbulência atmosférica foi simulada com a utilização de elementos geradores de turbulência instalados na câmara de simuladores, conforme mostrado na mesma Figura 54.

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad \text{equação 95}$$

$V(z)$ - velocidade média na altura z ;

V_{ref} - velocidade média de referência na altura z_{ref}

z_{ref} - cota de referência, 450 mm a partir do piso do túnel de vento;

z - cota vertical, medida a partir do piso do túnel de vento;

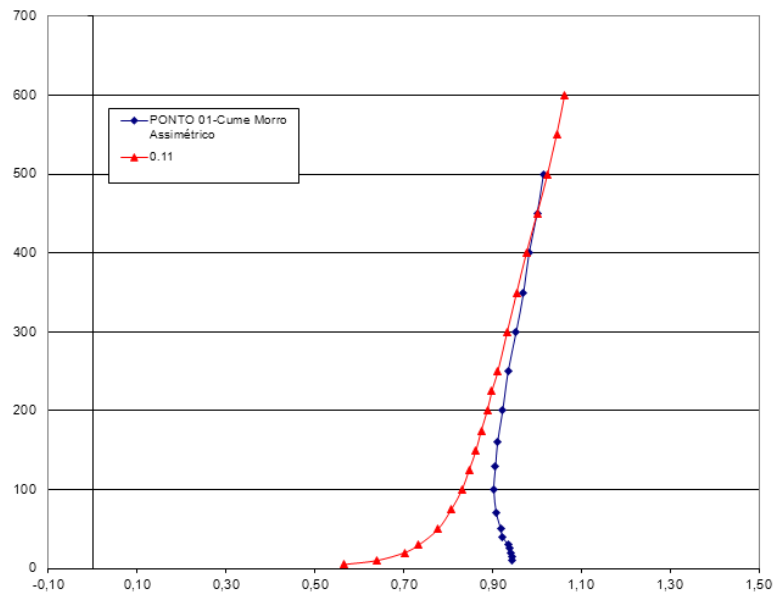
p - expoente da lei de potência

O valor obtido através de medições experimentais para o expoente - p da equação 95 para categoria I da NBR 6123(1988) foi de 0,11: ou seja, correlacionado a superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos: mar calmo, lagos e rios; pântanos sem vegetação. Para a categoria III-IV da NBR 6123, foi de 0,23 (BLESSMANN, 1990). A categoria categoria III corresponde a terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas, tipo granjas e casas de campo. Excetua-se matos; fazendas com sebes e/ou muros; subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas, com a altura média dos obstáculos igual a 3 m. A categoria IV representa terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada, tais como zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10

m. Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na categoria V.

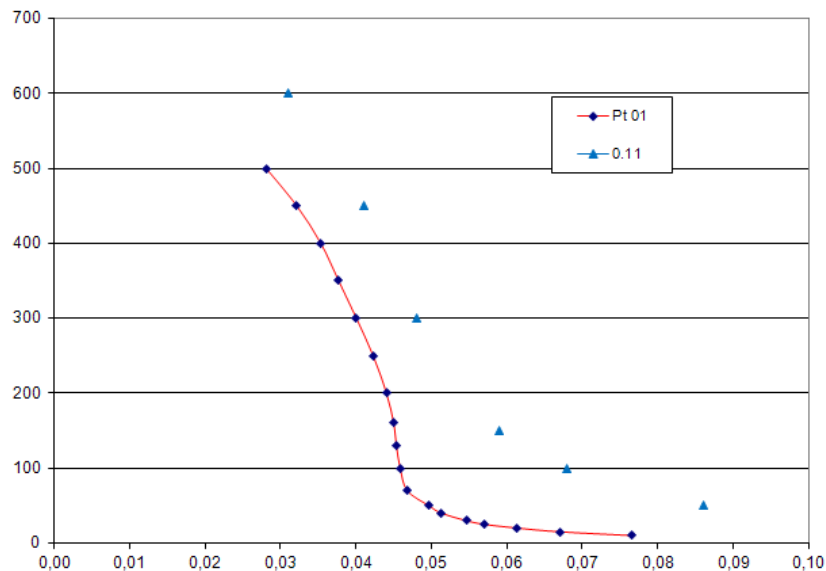
As Figuras 57 e 58 mostram as principais características do vento simulado investigadas, perfil vertical de velocidades médias e intensidade da turbulência. Na Figura 57, mostra o perfil vertical das velocidades médias coletadas pela relação entre a velocidade média em um ponto e a velocidade média normalizada na cota de referência (450 mm), no eixo longitudinal do túnel, no ponto da topografia do Modelo Experimento II – área complexa real-morro isolado e assimétrico comparado com o perfil do vento de categoria I ($p=0.11$). A totalidade da análise consta no Anexo B.

Figura 57 - Perfil vertical das velocidades médias medidas no ponto 1 do morro assimétrico- Experimento II comparado ao perfil vertical do vento de categoria I para 3D.



A Figura 58, mostra o gráfico da intensidade (II) da componente longitudinal da turbulência no mesmo ponto considerado.

Figura 58 - Perfil vertical intensidade da turbulência medidas no ponto 1 do morro assimétrico do Experimento II comparado ao perfil vertical da intensidade da turbulência para um vento da categoria I.



5.2.3.3 Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi feita através de um anemômetro da marca Dantec Dynamics, do Sistema Streamline 90 N S. O sistema referenciado trabalha com anemômetros de temperatura constante²⁸. O *lay-out* do Sistema StreamLine, observado na Figura 59 é constituído por uma moldura com até seis módulos, tendo sido empregado um módulo de fio quente e um calibrador de sonda automática, integrado ao computador. O quadro também tem entrada para um sensor de temperatura a qual é destinada à medição da temperatura do escoamento. A temperatura é usada para a correção dos dados do anemômetro, quando ocorrerem mudanças na temperatura do escoamento. O registro do sinal é feito pela sonda e a efetiva aquisição do sinal foi procedida com o emprego do programa Stream Ware, da mesma marca. A frequência de aquisição foi 2 kHz e o período de aquisição foi 64 s.

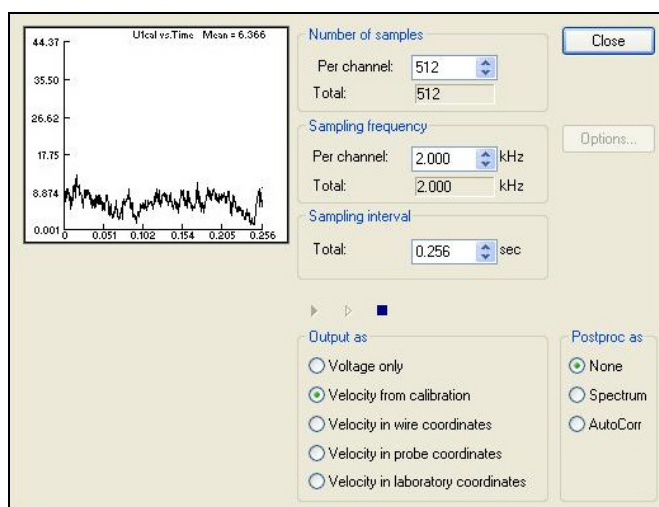
²⁸ Anemômetro de temperatura constante: usado para medir estruturas finas de gás turbulento e escoamentos líquidos. Principais características: a) medir desde velocidades de alguns cm/s até supersônicas; b) possuir alta resolução temporal: flutuações até várias centenas de kHz; c) possuir alta resolução espacial: redemoinhos até 1 mm ou menos; d) medir todos os três componentes de velocidade simultaneamente (DANTEDYNAMIC, 2011).

Figura 59 – Sistema StreamLine 90 N 10.



O Programa de aquisição de dados é da mesma procedência DantecDynamic. Possibilita a calibração, aquisição de dados e a acumulação dos mesmos. O programa Streamware oferece uma base de dados ampla. As funções empregadas na pesquisa foram: função banco de dados contendo dados específicos do projeto de instalação, calibração da sonda e dados adquiridos. A estrutura de banco de dados garante a rastreabilidade total de todas as ações dentro de um projeto. Na Figura 60, visualiza-se a janela de aquisição de dados do programa Streamware.

Figura 60 – Janela do Sistema StreamLine 90 N 10 no momento de calibração do mesmo para uso nas medições.



O equipamento ManoAir 500 mede a diferença de pressão entre os anéis piezométricos que situam-se na entrada do túnel e as medidas da temperatura média no interior do túnel em um intervalo de 65 s.

5.2.3.4 Modelos adotados

A pesquisa baseou-se em dois focos de investigação:

- a) O primeiro campo de investigação constituiu-se de oito modelos hipotéticos simétricos, quatro tridimensionais e quatro bidimensionais com a mesma altura e diferentes dimensões, analisados individualmente e comparados no que se refere às alterações do escoamento provocadas pelos modelos topográficos;
- b) O segundo campo de investigação constituiu-se por uma área complexa real integralizada por um morro assimétrico principal e vários outros secundários, com o desenvolvimento de medições de velocidade e turbulência no morro maior e em mais três pontos situados em solo, internos à área, de modo constituir o estudo da variação do escoamento devido a presença de elementos físicos de vizinhança em toda a gleba.

5.2.3.4.1 Experimento I – Modelos hipotéticos

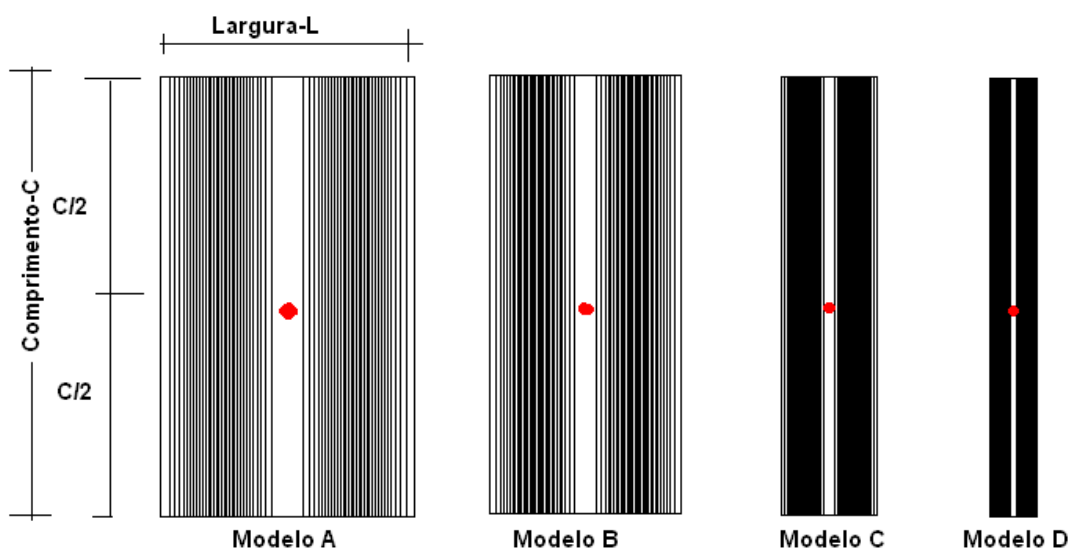
O Experimento I foi desenvolvido a partir dos modelos de Ferreira et al. (1995) para análise bidimensional e tridimensional procedidas a partir de quatro modelos para cada cenário, em escala 1:1000. Os modelos hipotéticos pesquisados A, B, C e D atenderam as dimensões que seguem na Tabela 30 para a mesma altura 150 mm:

Tabela 30 – Dimensões dos modelos bidimensionais do Experimento I.

Modelo	largura(mm)	comprimento(mm)	altura(mm)	Coordenadas dos pontos de medição
Modelo A	L= 784,98	C=1290	h=150	L=392,49; C=685; h=150;
Modelo B	L= 561,74	C=1290	h=150	L=280,87; C=685; h=150;
Modelo C	L= 280,86	C=1290	h=150	L=140,43; C=685; h=150;
Modelo D	L= 140,44	C=1290	h=150	L=70,22; C=685; h=150;

A Figura 61 mostra a vista superior dos modelos bidimensionais A, B, C e D e a localização dos pontos medidos.

Figura 61 - Modelos bidimensionais, em escala -vista superior e a localização dos pontos medidos.



As dimensões dos modelos hipotéticos tridimensionais atendem a Tabela 31.

Tabela 31 – Dimensões dos modelos em escala tridimensionais do Experimento I.

Modelo	base (mm)	altura(mm)	Coordenadas dos pontos de medição
Modelo A	b= 800	h=150	b=400; h=150
Modelo B	b= 600	h=150	b=300; h=150
Modelo C	b= 300	h=150	b=150; h=150
Modelo D	b= 150	h=150	b=75; h=150

A Figura 62 mostra as identificações de “b” e “h” para os modelos tridimensionais junto as demais Figuras 63, 64 e, 65 que mostram o corte e a vista superior dos mesmos.

Figura 62– Ponto medido-Modelo A – corte e vista superior.

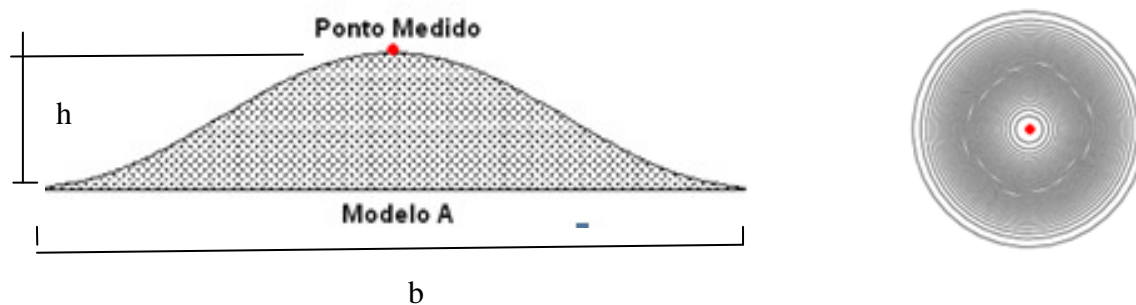


Figura 63 – Ponto medido-Modelo B– corte e vista superior.

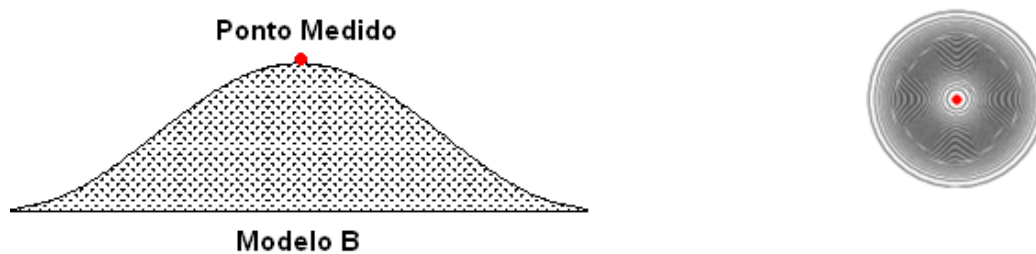


Figura 64 – Ponto medido-Modelo C corte e vista superior.



Figura 65 – Ponto medido-Modelo D corte e vista superior



Os modelos foram investigados a partir de pontos de medição localizados sob a diretriz principal do morro assimétrico. Em cada ponto foram medidas a velocidade do vento e a turbulência em 20 alturas: a saber, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 100, 130, 160, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 e 600 (cm). Para cada altura de determinado ponto foram coletadas 131.072 amostras de velocidade. As velocidades médias integralizadas nos cumes dos Modelos A, B, C e D constam nas Tabelas de 32 a 35 para $p=0,11$ e $0,23$ em 2D e 3D.

Os modelos experimentais foram fixados no piso do túnel com 02 parafusos de cada lado do modelo, conforme Figura 66.



Figura 66 - Fixação dos modelos no piso do túnel.

Os modelos utilizados foram construídos na oficina do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela equipe do Técnico Paulo Francisco Bueno. A execução das amostras empregou chapas de isopor de 4 mm de espessura coladas entre si com o adesivo comercial **PVA Cascorez Extra**, do fabricante **Henkel Ltda**. A construção dos modelos foi feita escalonadamente, conforme metodologia empregada atualmente em outros renomados laboratórios e de acordo com pesquisas de MERONEY (1990). O escalonamento objetiva equacionar o alto número de Reynolds.

Os modelos bidimensionais e tridimensionais, em testagem em túnel de vento, são mostrados nas figuras de 67 a 74.

Figura 67 - Modelo A - 2D



Figura 68 - Modelo A - 3D



Figura 69 - Modelo A - 2D



Figura 70 - Modelo A - 3D

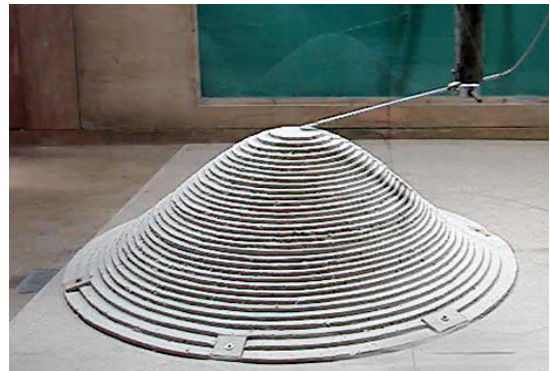


Figura 71 - Modelo B - 2D

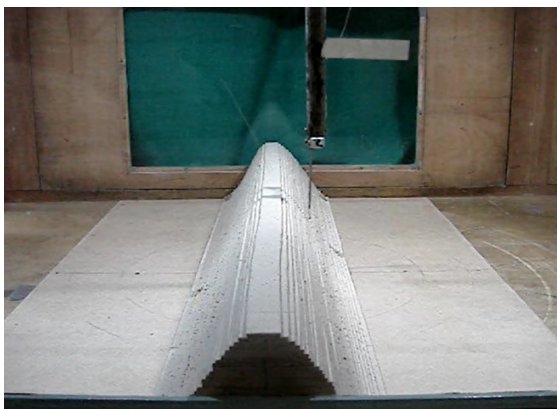


Figura 72 - Modelo B - 3D

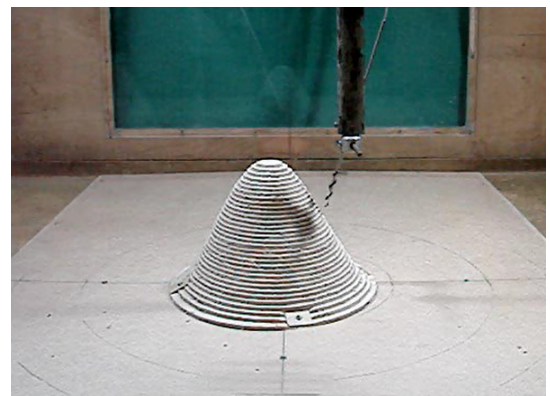


Figura 73 - Modelo D - 2D

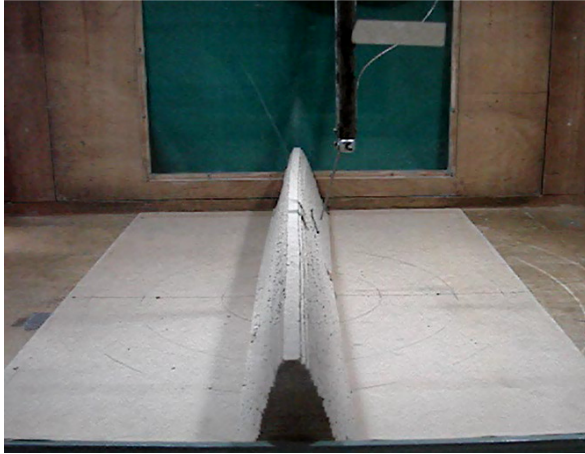
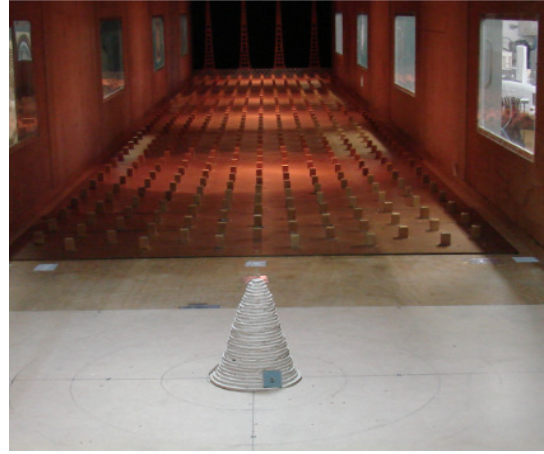


Figura 74 - Modelo D -3D

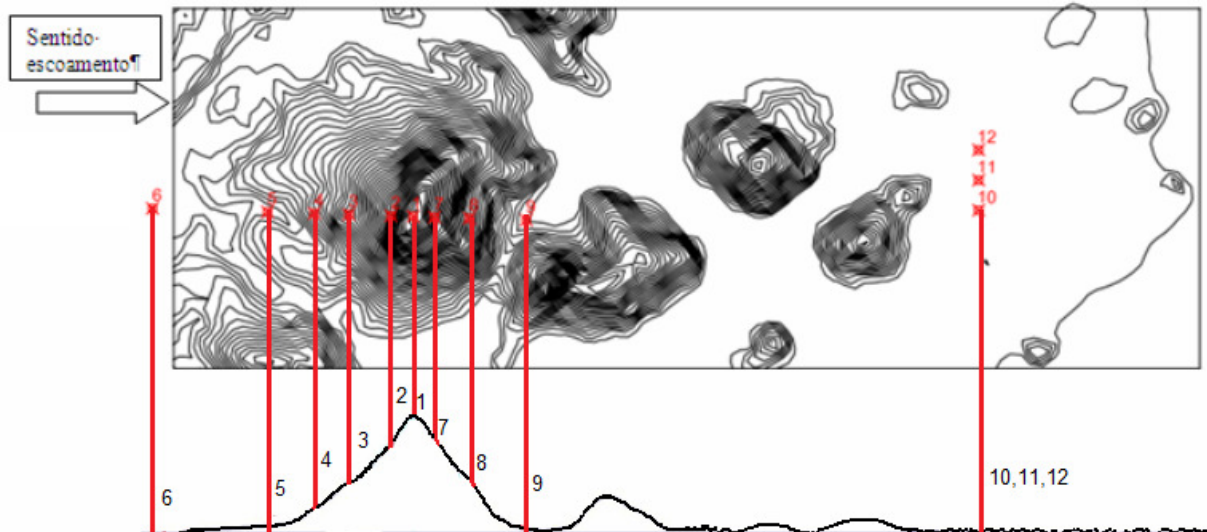


5.2.3.4.2 Experimento II – Área complexa real composta por morro isolado e assimétrico, três pequenos morros baixos e simétricos e avaliação de três pontos geográficos em solo internos à área

O morro principal da área complexa investigada denomina-se Morro Jaburu e localiza-se no Bairro Gurigica, Município de Vitória, Estado do Espírito Santo, Brasil. Essa área complexa foi reproduzida em um modelo em escala 1:1000 com os elementos de rugosidade e barreira representativos da rugosidade existente no local.

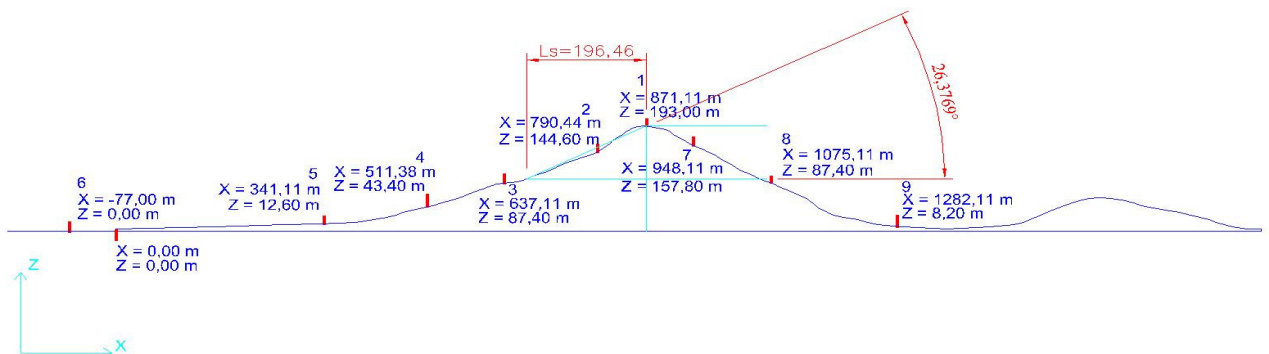
A alteração do escoamento pela presença do morro foi avaliada através da locação de nove pontos de medições sobre a diretriz principal do morro, coincidentes com a direção do escoamento. Os pontos foram medidos em 20 alturas. Também integrou a investigação da área complexa, três pontos em solo que internos à área, medidos nas mesmas alturas. A posição da diretriz de locação dos pontos medidos sobre o morro e dos três pontos do entorno da área, em planta baixa é mostrada na Figura 75.

Figura 75 - Localização dos pontos de medição no Experimento II - área complexa real integralizada por morro isolado e assimétrico, três pequenos morros baixos e simétricos e três pontos do entorno em planta baixa e em corte.



A Figura 76 mostra as coordenadas dos pontos localizados no morro isolado, em corte.

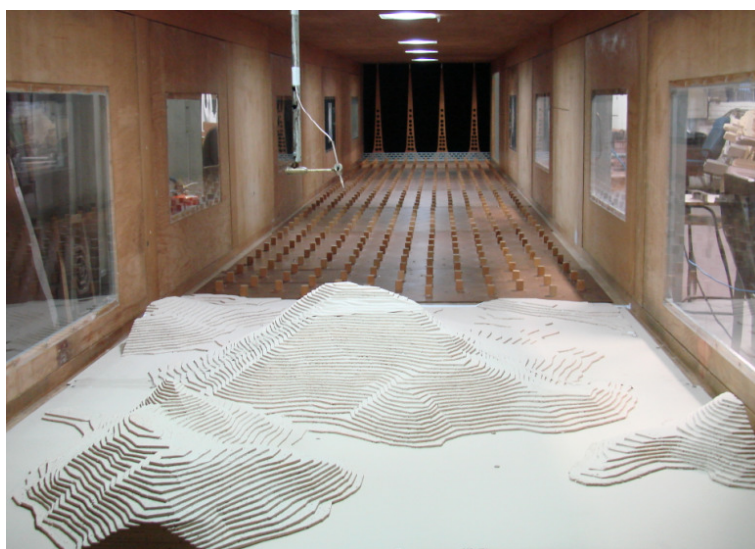
Figura 76 - Coordenadas dos pontos de medição localizados na diretriz do morro isolado assimétrico principal incluso na área complexa real.



De acordo com as coordenadas identificadas nas Figuras 75 e 76, foi construído o modelo experimental correspondente em escala 1:1000. Como condição da melhor realização dos testes, o mesmo foi fixado no piso da seção de ensaio, estando o entorno da área real representada por elementos de rugosidade do tipo tacos de madeira. Na Figura 77 visualiza-se

a diretriz principal do morro isolado e assimétrico, assinalada em vermelho, onde definiram-se os nove pontos de medição, medidos em 20 alturas. Visualiza-se também na citada figura a área de rugosidade simulada. O critério de medida da velocidade e da turbulência seguiu a metodologia adotada para as medições do Experimento I- modelos hipotéticos simétricos, bi e tridimensionais.

Figura 77 - Fixação modelo, diretriz de localização dos pontos de medição no morro principal e elementos de barreira empregados no Experimento II – área complexa real.



A Figura 78 mostra a diretriz principal do morro (em vermelho) onde foram locados os pontos de medição do experimento na locação 01, vista no momento da medição no cume do morro.

Figura 78 - Área complexa experimental contendo morro isolado e assimétrico, e mais três pontos mostrados no momento do experimento no túnel Prof^o Joaquim Blessmann da UFRGS.



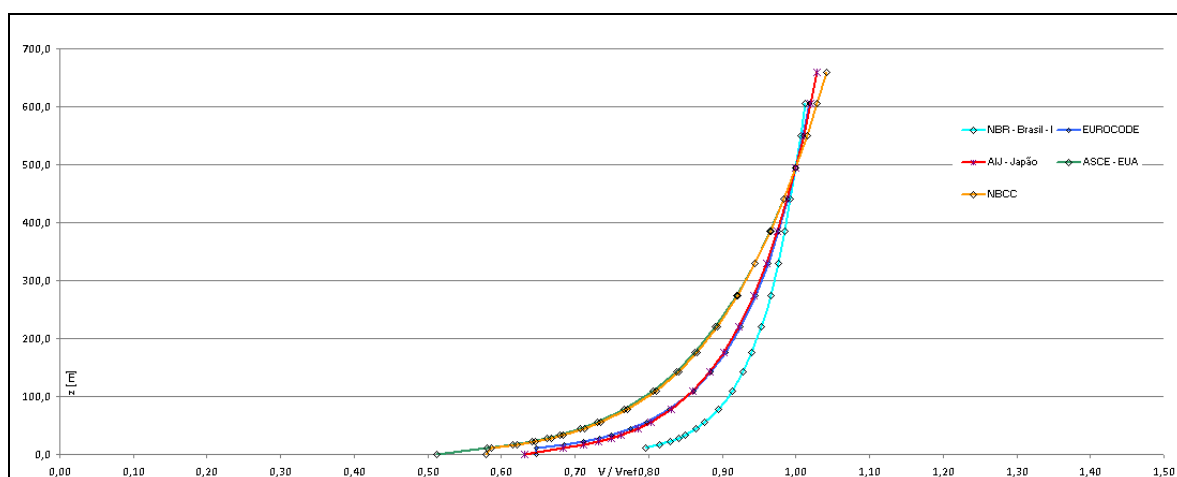
6 RESULTADOS

Os resultados da pesquisa são de ordem experimental, por meio de medições em túnel de vento nos pontos identificados dos Experimentos I e II e empíricos, através da interpretação e aplicação das normas analíticas NBR 6123(1988), EUROCODE - CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, AS/NSZ:2002, ASCE 7-95: 2005 e NBCC: 2005 dos pontos mencionados, nos referidos modelos, os quais passam a ser apresentados. Os resultados dos perfis experimentais são vistos nas Tabelas de 32 a 37 e os resultados comparados às normas analíticas são mostrados nas Figuras 80 a 95 para cume dos modelos simétricos medidos bi e tridimensionalmente e nas Figuras 96 a 113 para morro assimétrico. Nas Figuras 114 a 119 são mostrados os resultados dos pontos em solo inclusos na área complexa.

6.1 TERRENO PLANO

A análise inicial considerou a aplicação dos modelos analíticos a um terreno plano, sem rugosidade. Os resultados são apresentados na Figura 79.

Figura 79 - Aplicação dos modelos analíticos das normas **NBR 6123(1988)**, **EUROCODE-CEN TC 250: 2002**, **AIJ: 2004**, **AS/NZS: 1170.2:2002**, **ASCE 7-95:2005** e **NBCC:2005** a um terreno plano, sem rugosidade.



6.2 MORROS ISOLADOS SIMÉTRICOS

A medição experimental do escoamento em túnel de vento para ventos com $p=0,11$ e $p=0,23$ em 2D e 3D e a aplicação dos modelos analíticos das normas citadas para os cumes dos morros dos modelos hipotéticos simétricos, A, B, C e D do Experimento I mostraram os resultados que seguem.

Experimento I – Modelos Hipotéticos A, B, C e D - valores experimentais

As Tabelas de 32 e 33 apresentam os valores obtidos para as medições realizadas no Experimento I – modelos hipotéticos A, B, C e D para o perfil de vento $p = 0,11$ (área plana e sem rugosidade).

Tabela 32 - Velocidades de vento medidas no cume dos modelos A, B, C e D, em 21 alturas cada para perfil de vento $p = 0,11$ - área plana e sem rugosidade, para medição 2D, normalizadas a 275 m.

p = 0.11- 2D					
z(mm)	z(m)	V/V ₂₇₅			
		Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
0	0,0	0	0	0	0
5	5,5	0	0,3747	0,1217	0,1217
10	11,0	0,8256	0,7823	0,8817	0,8817
15	16,5	0,9595	0,9551	0,9775	0,9775
20	22,0	0,9907	0,9857	0,9765	0,9765
30	33,0	0,9950	0,9905	0,9680	0,9680
40	44,0	0,9957	0,9909	0,9656	0,9656
50	55,0	0,9974	0,9897	0,9662	0,9662
75	82,5	0,9946	0,9911	0,9660	0,9660
100	110,0	0,9936	0,9913	0,9691	0,9691
125	137,5	0,9930	0,9905	0,9731	0,9731
150	165,0	0,9934	0,9922	0,9810	0,9810
175	192,5	0,9946	0,9922	0,9822	0,9822
200	220,0	0,9951	0,9960	0,9890	0,9890
225	247,5	0,9979	0,9960	0,9959	0,9959
250	275,0	1	1	1	1
275	302,5	1,0025	1,0032	1,0039	1,0039
300	330,0	1,0049	1,0072	1,0097	1,0097
325	357,5	1,0088	1,0111	1,0129	1,0129
350	385,0	1,0108	1,0143	1,0179	1,0179
400	440,0	1,0167	1,0219	1,0263	1,0263
450	495,0	1,0243	1,0291	1,0363	1,0363
			1,0350	1,0421	1,0421

Tabela 33 - Velocidades de vento medidas no cume dos Modelos A, B, C e D, em 21 alturas cada para perfil de vento $p = 0,11$ - área plana e sem rugosidade, para medição 3D, normalizadas a 275 m.

$p = 0.11-3D$					
z(mm)	z(m)	V/V_{275}			
		Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
0	0,0				
5	5,5	0,6368	0,8689	1,0187	1,0187
10	11,0	0,9528	0,9870	1,0148	1,0148
15	16,5	0,9773	0,9887	0,9994	0,9994
20	22,0	0,9825	0,9898	0,9859	0,9859
30	33,0	0,9867	0,9865	0,9659	0,9659
40	44,0	0,9867	0,9816	0,9577	0,9577
50	55,0	0,9848	0,9752	0,9521	0,9521
75	82,5	0,9808	0,9663	0,9508	0,9508
100	110,0	0,9789	0,9652	0,9552	0,9552
125	137,5	0,9769	0,9703	0,9651	0,9651
150	165,0	0,9838	0,9745	0,9721	0,9721
175	192,5	0,9868	0,9810	0,9797	0,9797
200	220,0	0,9917	0,9891	0,9874	0,9874
225	247,5	0,9966	0,9938	0,9933	0,9933
250	275,0	1	1	1	1
275	302,5	1,0040	1,0063	1,0072	1,0072
300	330,0	1,0099	1,0089	1,0129	1,0129
325	357,5	1,0142	1,0139	1,0188	1,0188
350	385,0	1,0186	1,0183	1,0225	1,0225
400	440,0	1,0255	1,0268	1,0308	1,0308
450	495,0	1,0316	1,0333	1,0389	1,0389
		1,0385	1,0386	1,0441	1,0441

As Tabelas de 34 e 35 apresentam os valores da velocidade do vento obtidos para as medições realizadas no Experimento I-morros hipotéticos simétricos A, B, C e D para o perfil $p = 0,23$ (área com pouca densificação).

Tabela 34 - Velocidades de vento medidas no cume dos Modelos A, B, C e D, em 21 alturas para perfil de vento $p = 0,23$ - área com pouca rugosidade, para medição 2D, normalizadas a 275 m.

$p = 0.23-2D$					
z(mm)	z(m)	V/V_{275}			
		Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
0	0,0				
5	5,5	0,6539	0,5086	0,1377	0,0726
10	11,0	0,8060	0,8246	0,1566	0,3411
15	16,5	0,8792	0,8910	0,4247	0,8601
20	22,0	0,9043	0,9086	0,8699	0,8870
30	33,0	0,9196	0,9165	0,9341	0,8745
40	44,0	0,9172	0,9113	0,9307	0,8666
50	55,0	0,9198	0,9160	0,9307	0,8633
75	82,5	0,9268	0,9172	0,9281	0,8684
100	110,0	0,9312	0,9249	0,9402	0,8818
125	137,5	0,9441	0,9377	0,9508	0,8989
150	165,0	0,9522	0,9522	0,9633	0,9251
175	192,5	0,9687	0,9649	0,9725	0,9437
200	220,0	0,9774	0,9782	0,9840	0,9623
225	247,5	0,9910	0,9877	0,9890	0,9836
250	275,0	1	1	1	1
275	302,5	1,0044	1,0110	1,0086	1,0168
300	330,0	1,0129	1,0218	1,0121	1,0296
325	357,5	1,0179	1,0291	1,0172	1,0392
350	385,0	1,0207	1,0327	1,0201	1,0500
400	440,0	1,0261	1,0396	1,0252	1,0617
450	495,0	1,0343	1,0440	1,0311	1,0748
		1,0425	1,0550	1,0389	1,0894

Tabela 35 - Velocidades de vento medidas no cume dos Modelos A, B, C e D, em 21 alturas para perfil de vento $p = 0,23$ - área com pouca rugosidade, para medição 3D, normalizadas a 275 m.

$p = 0.23-3D$					
z(mm)	z(m)	V/V_{275}			
		Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
0	0,0				
5	5,5	0,7637	0,8614	0,8967	0,8877
10	11,0	0,8531	0,8909	0,8874	0,8740
15	16,5	0,8784	0,8907	0,8814	0,8658
20	22,0	0,8829	0,8912	0,8788	0,8622
30	33,0	0,8952	0,8977	0,8766	0,8594
40	44,0	0,8974	0,8953	0,8757	0,8630
50	55,0	0,8994	0,8981	0,8805	0,8681
75	82,5	0,9155	0,9071	0,8985	0,8845
100	110,0	0,9269	0,9220	0,9150	0,9036
125	137,5	0,9412	0,9359	0,9310	0,9206
150	165,0	0,9562	0,9534	0,9480	0,9416
175	192,5	0,9632	0,9661	0,9666	0,9596
200	220,0	0,9820	0,9804	0,9818	0,9768
225	247,5	0,9906	0,9929	0,9922	0,9867
250	275,0	1	1	1	1
275	302,5	1,0068	1,0076	1,0093	1,0061
300	330,0	1,0114	1,0158	1,0146	1,0159
325	357,5	1,0137	1,0206	1,0190	1,0198
350	385,0	1,0176	1,0246	1,0214	1,0274
400	440,0	1,0271	1,0323	1,0335	1,0354
450	495,0	1,0361	1,0454	1,0480	1,0481
		1,0488	1,0586	1,0632	1,0627

A medição experimental do escoamento em túnel de vento para ventos com $p = 0,11$ e $p = 0,23$ em 2D e em 3D e a aplicação das normas analíticas citadas para os cumes dos modelos do Experimento I: modelos hipotéticos A, B, C e D - morros isolados simétricos bi e tridimensionais mostraram os resultados que seguem nas Figuras de 80 a 95.

**Experimento I - Modelo morro isolado simétrico A -
medição experimental tridimensional**

Figura 82 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D,
modelo A, cume, categoria I, $p=0,11$.

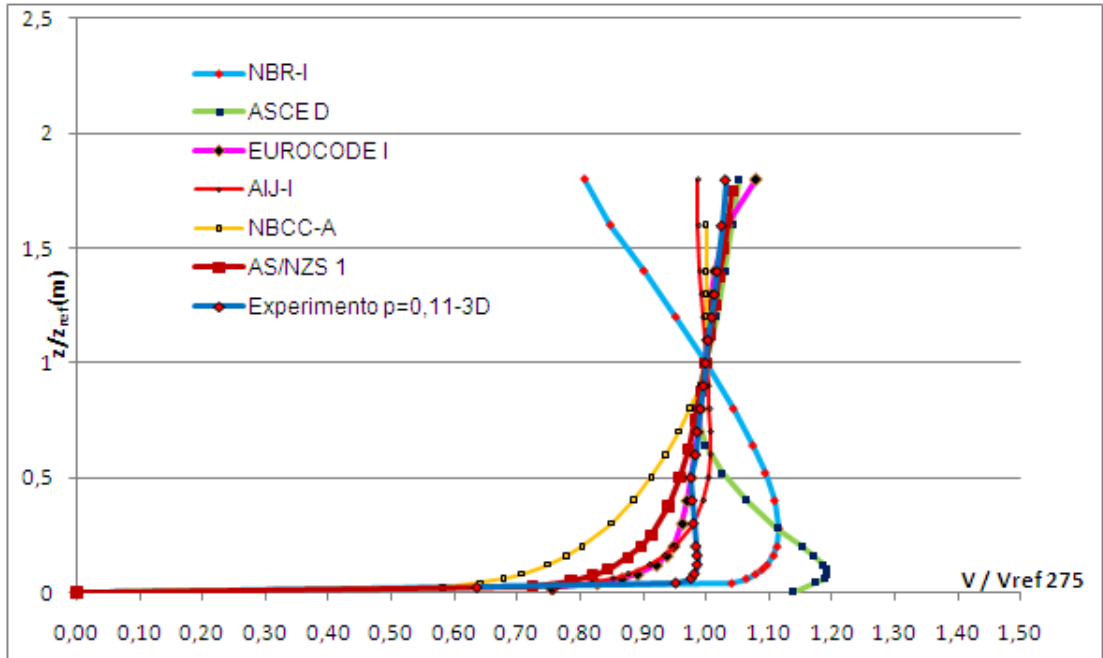
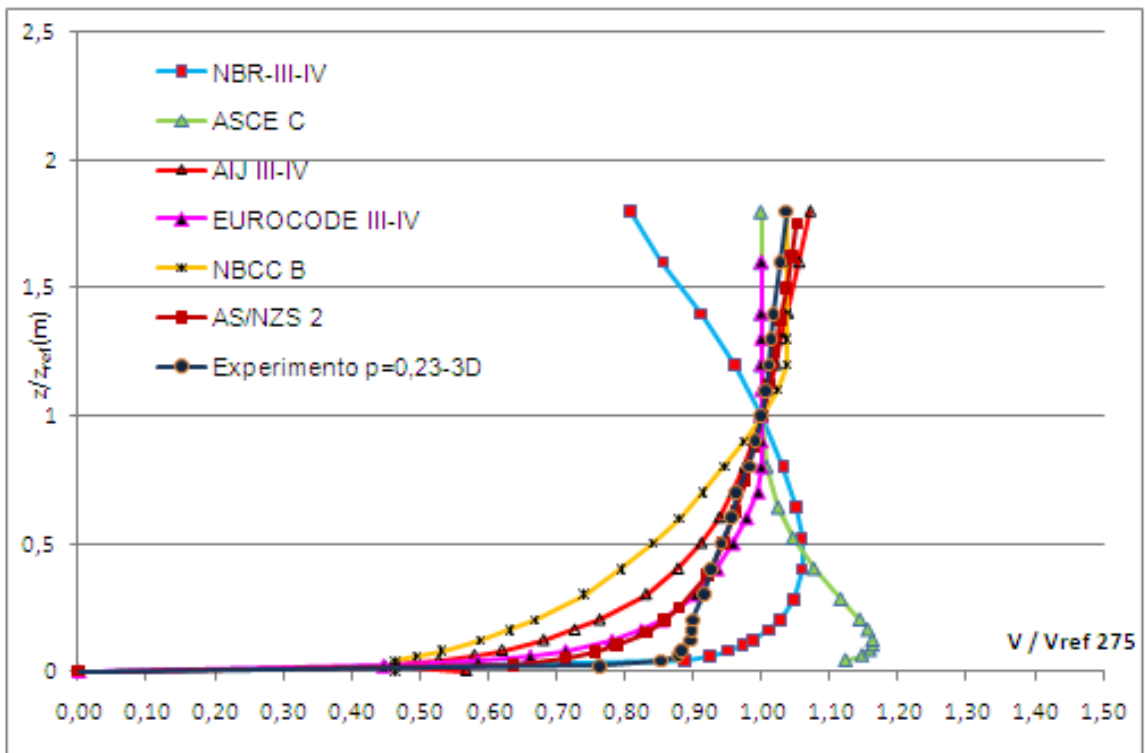


Figura 83 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D,
modelo A, cume, categorias III-IV, $p=0,23$.



**Experimento I - Modelo morro isolado simétrico B -
medição experimental bidimensional**

Figura 84 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 2D,
modelo B, cume, categoria I, $p=0,11$.

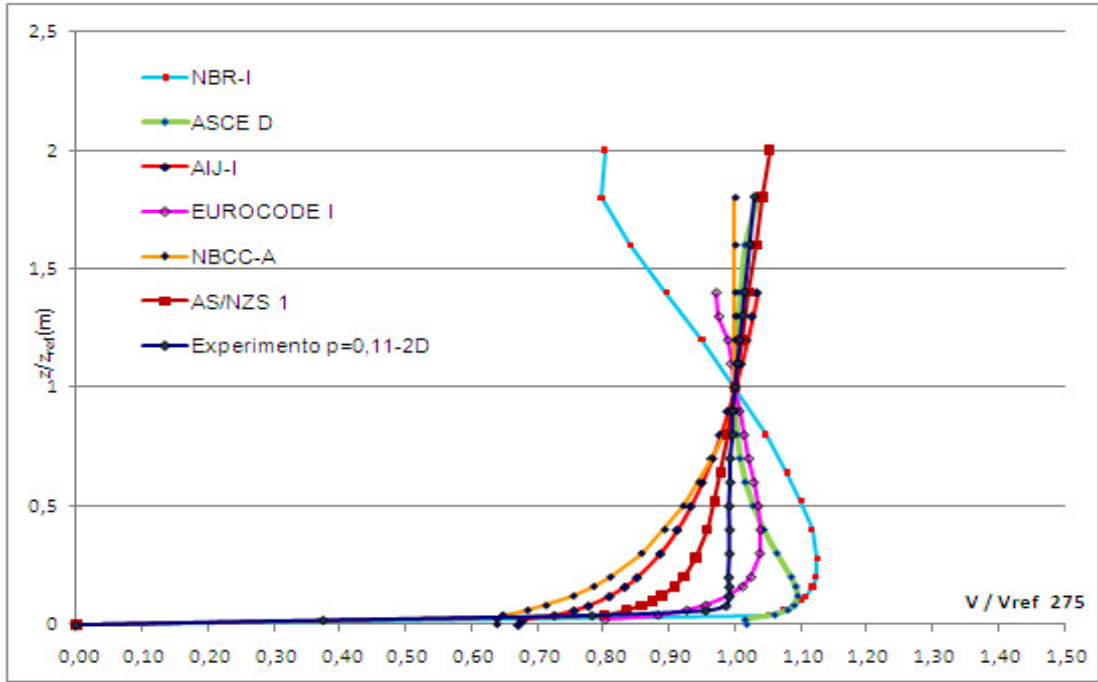
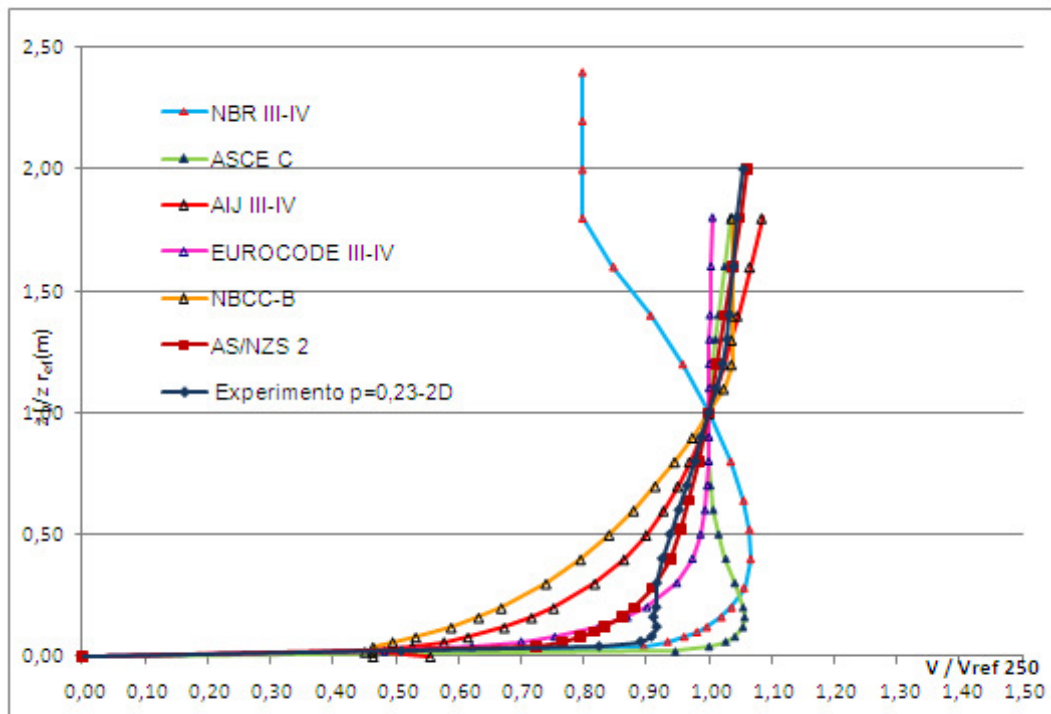


Figura 85 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 2D,
modelo B, cume, categorias III-IV, $p=0,23$.



**Experimento I- Modelo morro isolado simétrico B –
medição experimental tridimensional**

Figura 86 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D,
modelo B, cume, categoria I, $p=0,11$.

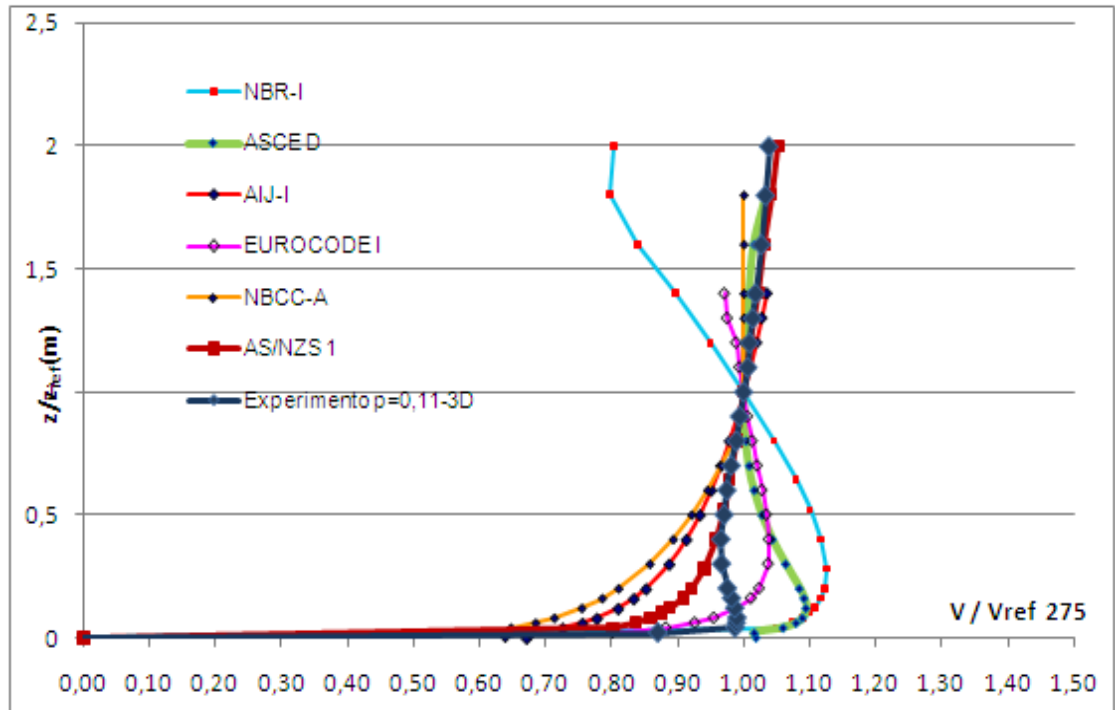
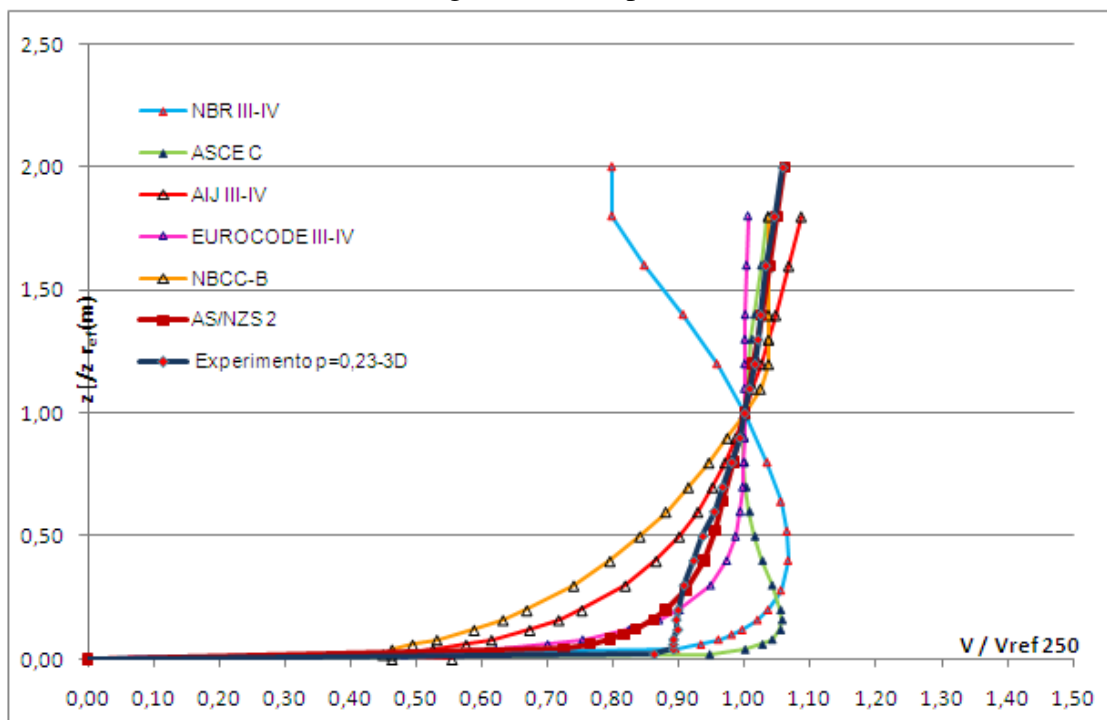


Figura 87 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, modelo B, cume,
categorias III-IV, $p=0,23$.



**Experimento I- Modelo morro isolado simétrico C -
medição experimental bidimensional**

Figura 88 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 2D,
modelo C, cume, categoria I, $p=0,11$.

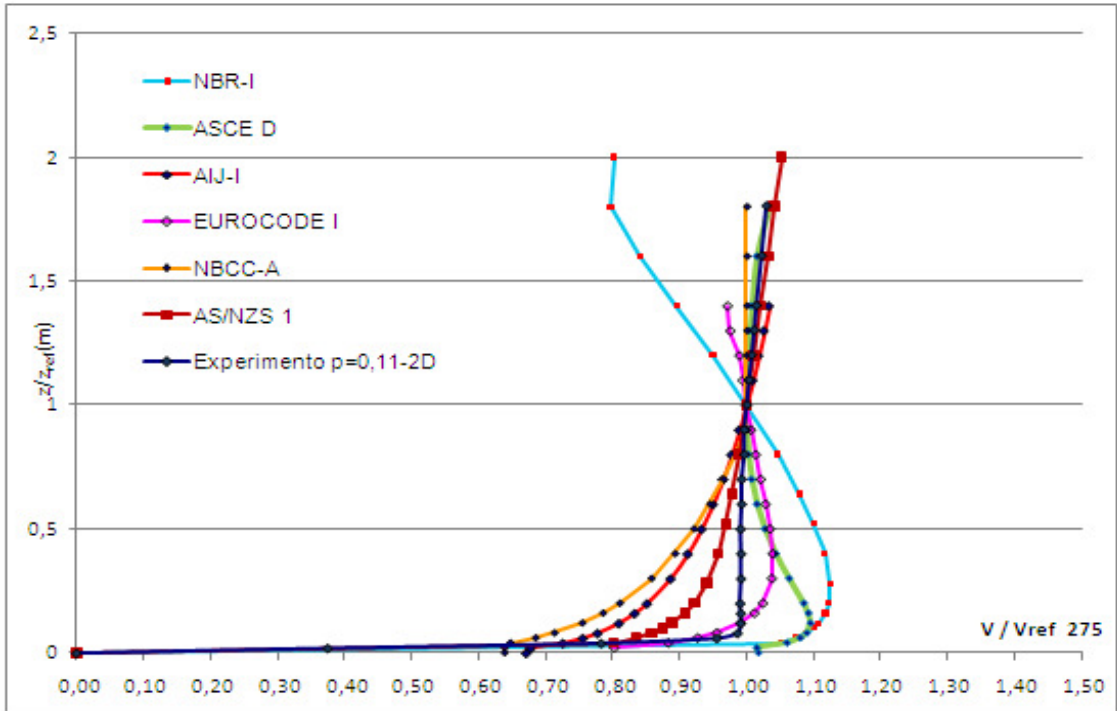
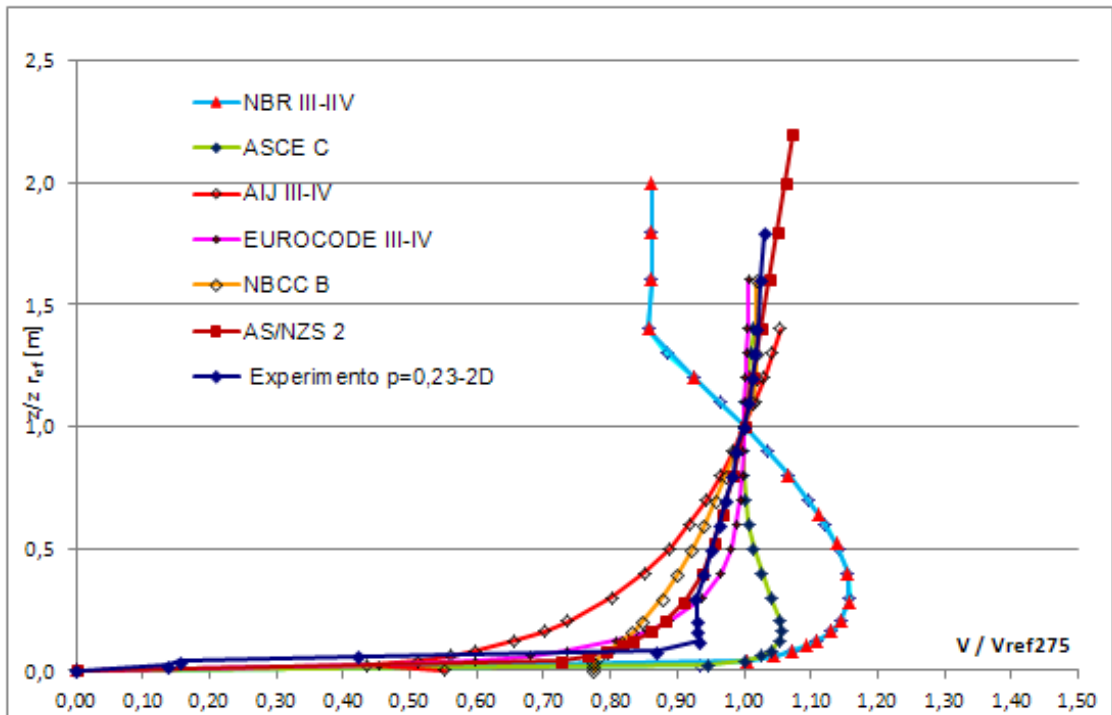


Figura 89 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 2D,
modelo C, cume, categorias III-IV, $p=0,23$.



**Experimento I - modelo morro isolado simétrico C –
medição experimental tridimensional**

Figura 90 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D,
modelo C, cume, categoria I, $p=0,11$.

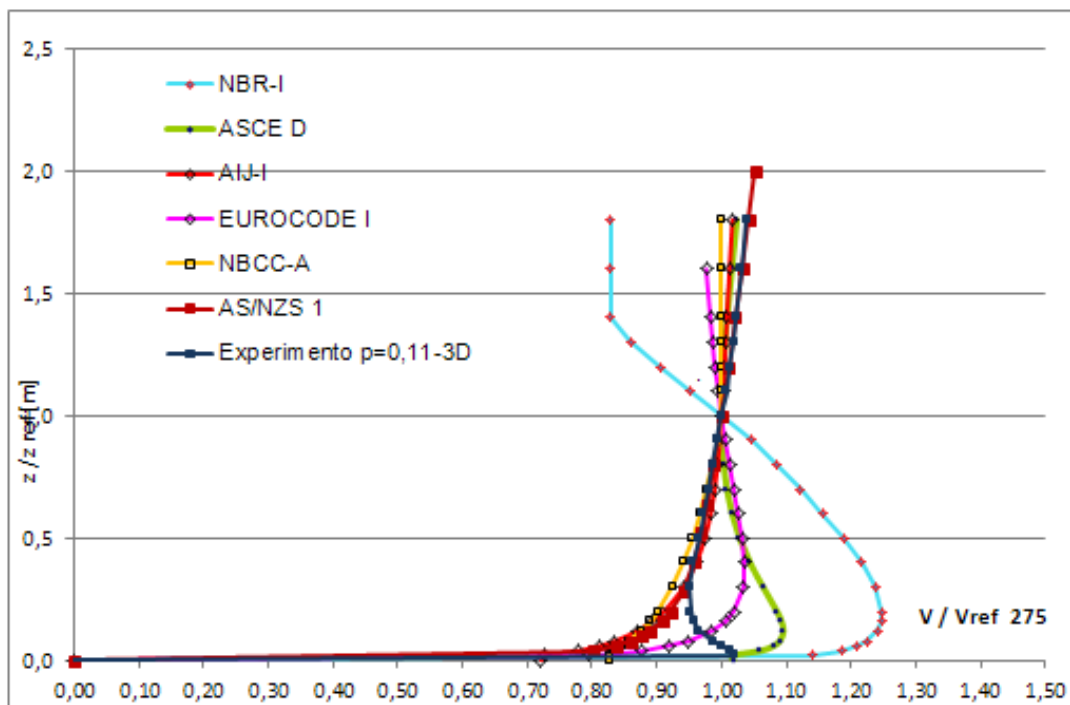
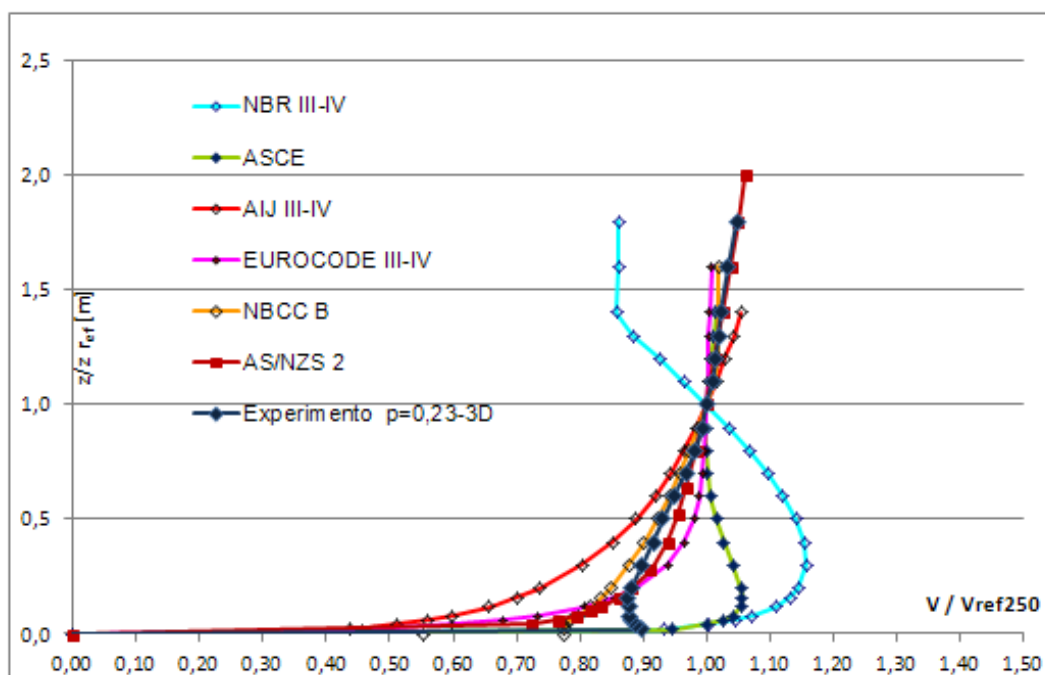


Figura 91 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D,
modelo C, cume, categorias III-IV, $p=0,23$.



Experimento I- Modelo morro isolado simétrico D – medição experimental bidimensional

Figura 92 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 2D,
modelo D, cume, categoria I, $p=0,11$.

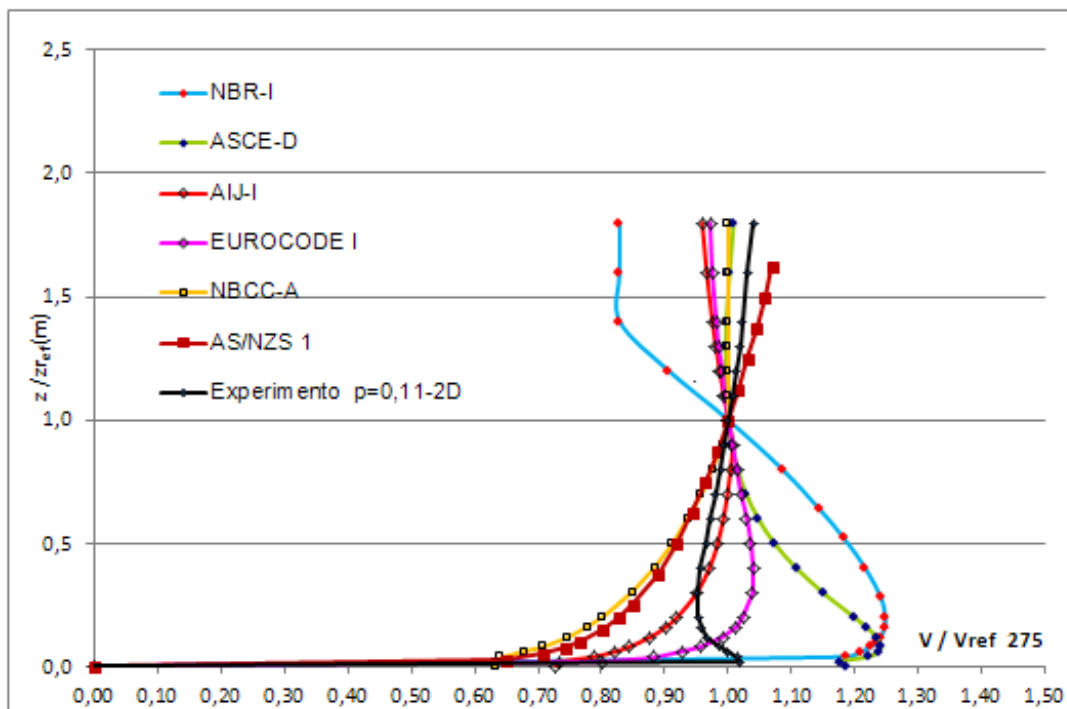
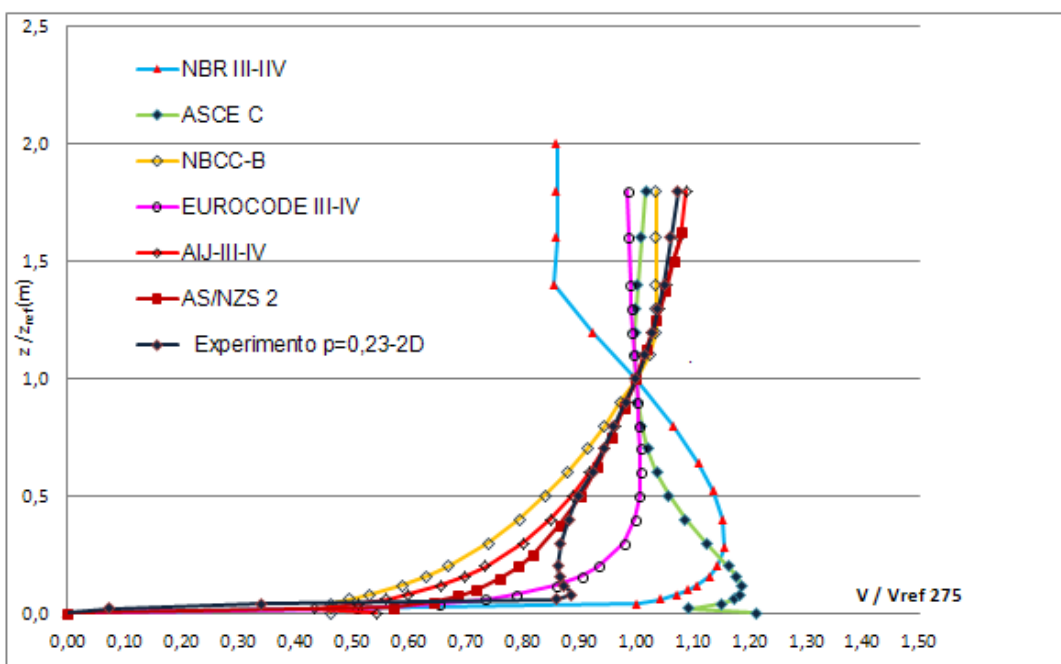


Figura 93 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 2D,
modelo D, cume, categorias III-IV, $p=0,23$.



Experimento I - Modelo morro isolado simétrico D - medição experimental tridimensional

Figura 94 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, modelo D, cume, categoria I, $p=0,11$.

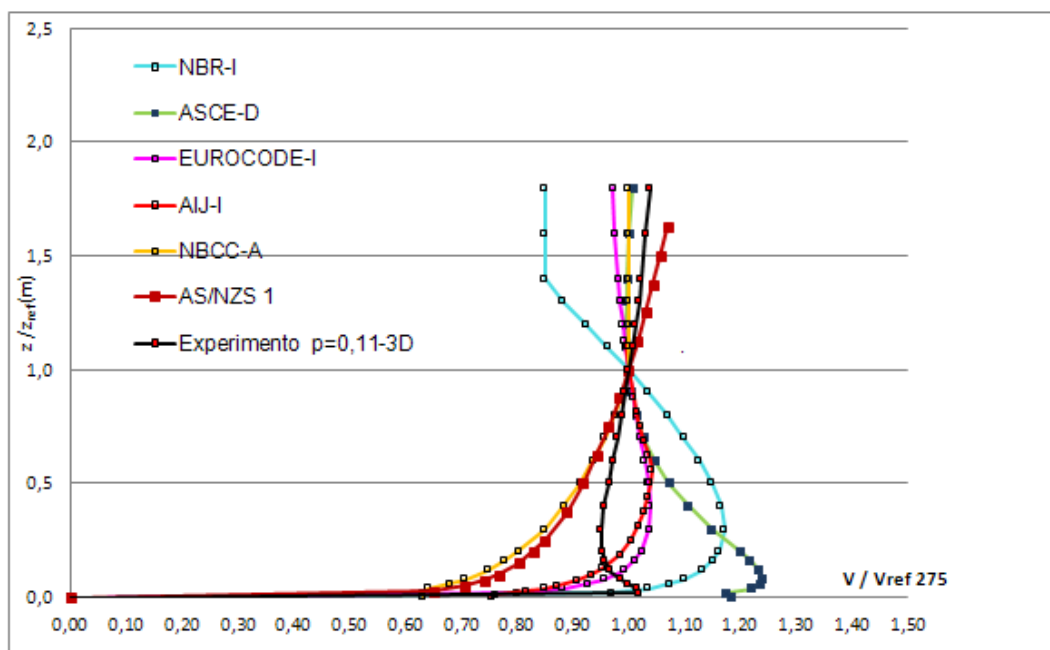
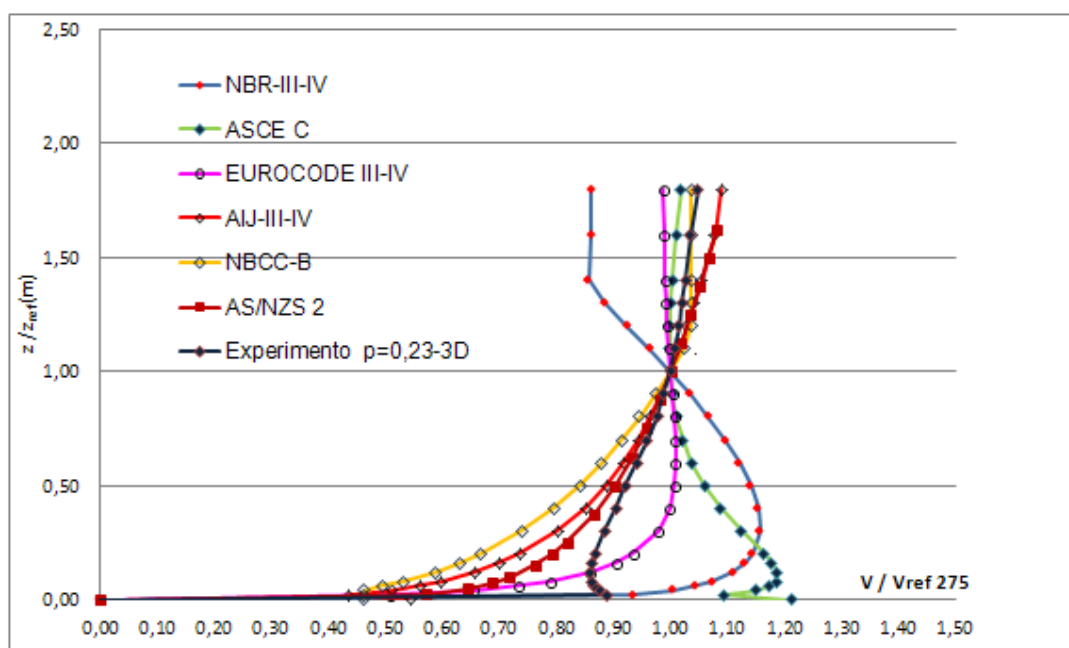


Figura 95 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, modelo D, cume, categorias III-IV, $p=0,23$.



6.3 ÁREA COMPLEXA COMPOSTA POR MORRO ISOLADO E ASSIMÉTRICO E TRÊS PONTOS INTERNOS A MESMA

A medição experimental do escoamento em túnel de vento da área complexa contendo um morro assimétrico, três morros menores e três pontos em solo, para ventos com $p=0,11$ e $p=0,23$ em 3D mostraram os resultados que seguem:

Experimento II – Área complexa real - valores experimentais

As Tabelas de 36 e 37 apresentam os valores obtidos para as medições realizadas no Experimento II- área complexa-morro assimétrico, pontos de 1 a 9 e pontos em solo, de 10 a 12, todos para os perfis $p= 0,11$ (área plana e sem rugosidade) e $p=0,23$ (área com pouca densificação).

Tabela 36– Velocidades de vento medidas nos pontos assinalados da área complexa em 20 alturas para cada ponto, para o perfil de vento $p=0,11$ - área plana e sem rugosidade normalizados a 275 m,

p=0.11							
z(mm)	z(m)	V/V₂₇₅					
		PT01	PT02	PT03	PT04	PT05	PT06
10	11,0	1,0090	0,4382	0,4775	0,5100	0,4978	0,6294
15	16,5	1,0106	0,5722	0,5638	0,5561	0,5602	0,6667
20	22,0	1,0075	0,6447	0,6131	0,6049	0,6155	0,7047
25	27,5	1,0025	0,6916	0,6516	0,6444	0,6656	0,7243
30	33,0	1,0002	0,7289	0,6728	0,6746	0,6933	0,7533
40	44,0	0,9864	0,7855	0,7118	0,7219	0,7460	0,7850
50	55,0	0,9822	0,8284	0,7490	0,7525	0,7754	0,8146
70	77,00	0,9719	0,8794	0,7963	0,8021	0,8261	0,8585
100	110,0	0,9655	0,9213	0,8485	0,8537	0,8719	0,8942
130	143,0	0,9698	0,9399	0,8901	0,8904	0,9067	0,9205
160	176,0	0,9747	0,9585	0,9245	0,9254	0,9273	0,9398
200	220,0	0,9867	0,9776	0,9652	0,9598	0,9612	0,9728
250	275,0	1	1	1	1	1	1
300	330,00	1,0194	1,0231	1,0351	1,0368	1,0299	1,0283
350	385,00	1,0371	1,0461	1,0662	1,0711	1,0640	1,0571
400	440,00	1,0503	1,0653	1,0831	1,1003	1,0934	1,0884
450	495,00	1,0696	1,0860	1,1183	1,1307	1,1208	1,1133
500	550,00	1,0852	1,1028	1,1395	1,1571	1,1498	1,1379
550	605,0				1,1795	1,1709	1,1664
600	600,00					1,1943	1,1931
p=0.11							
z(mm)	z(m)	V/V₂₇₅					
		PT07	PT08	PT09	PT10	PT11	PT12
10	11,0	0,0516	0,1221	0,1848	0,5234	0,6518	0,5913
15	16,5	0,0575	0,1183	0,1851	0,5651	0,6893	0,6177
20	22,0	0,0632	0,1266	0,1818	0,6103	0,7253	0,6366
25	27,5	0,0639	0,1253	0,1742	0,6597	0,7372	0,6444
30	33,0	0,0664	0,1253	0,1698	0,6824	0,7539	0,6517
40	44,0	0,0978	0,1292	0,1693	0,7324	0,7698	0,6712
50	55,0	0,4130	0,1283	0,1718	0,7705	0,7805	0,6908
70	77,00	0,9526	0,1351	0,1851	0,8054	0,8022	0,7088
100	110,0	0,9745	0,1429	0,2069	0,8474	0,8285	0,7441
130	143,0	0,9827	0,3856	0,2530	0,8681	0,8510	0,7955
160	176,0	0,9861	0,9199	0,3620	0,8929	0,8822	0,8410
200	220,0	0,9870	1,0013	0,6424	0,9330	0,9229	0,9071
250	275,0	1	1	1	1	1	1
300	330,00	1,0118	1,0097	1,0443	1,0778	1,0957	1,0887
350	385,00	1,0290	1,0218	1,0608	1,1447	1,1970	1,1689
400	440,00	1,0438	1,0346	1,0704	1,1882	1,2730	1,2360
450	495,00	1,0613	1,0475	1,0909	1,2277	1,3242	1,2770
500	550,00	1,0747	1,0646	1,1068	1,2538	1,3553	1,3051
550	605,0		1,0793	1,1259	1,2738	1,3861	1,3379
600	600,00			1,1435	1,2981	1,4143	1,3640

Tabela 37 – Velocidades de vento medidas nos pontos assinalados da área complexa em 20 alturas para cada ponto, para o perfil de vento $p=0,23$ - área com pouca rugosidade normalizadas a 275 m.

p=0.23							
z(mm)	z(m)	V/V₂₇₅					
		PT01	PT02	PT03	PT04	PT05	PT06
10	11,0	0,8831	0,4413	0,4196	0,3978	0,3937	0,3554
15	16,5	0,8820	0,5339	0,4837	0,4430	0,4497	0,4081
20	22,0	0,8903	0,5957	0,5152	0,4764	0,4797	0,4395
25	27,5	0,8923	0,6378	0,5471	0,4956	0,5041	0,4851
30	33,0	0,8923	0,6677	0,5659	0,5193	0,5227	0,5223
40	44,0	0,8923	0,7265	0,6096	0,5622	0,5678	0,5763
50	55,0	0,8938	0,7690	0,6260	0,5978	0,5963	0,6203
70	77,00	0,9004	0,8286	0,6907	0,6573	0,6548	0,7046
100	110,0	0,9181	0,8873	0,7654	0,7309	0,7367	0,7740
130	143,0	0,9359	0,9246	0,8286	0,8000	0,8010	0,8219
160	176,0	0,9536	0,9477	0,8831	0,8609	0,8368	0,8793
200	220,0	0,9730	0,9790	0,9367	0,9245	0,9228	0,9354
250	275,0	1	1	1	1	1	1
300	330,00	1,0162	1,0110	1,0518	1,0508	1,0562	1,0582
350	385,00	1,0281	1,0180	1,0848	1,1044	1,1132	1,1032
400	440,00	1,0418	1,0270	1,1118	1,1425	1,1490	1,1494
450	495,00	1,0562	1,0387	1,1308	1,1708	1,1876	1,1779
500	550,00	1,0678		1,1468	1,1881		1,1983
550	605,0			1,1625	1,2096		1,2089
600	600,00						
p=0.23							
z(mm)	z(m)	V/V₂₇₅					
		PT07	PT08	PT09	PT10	PT11	PT12
10	11,0	0,0747	0,1379	0,1822	0,5086	0,5926	0,5812
15	16,5	0,0813	0,1329	0,1956	0,5512	0,6251	0,5962
20	22,0	0,0893	0,1289	0,2038	0,6026	0,6632	0,6140
25	27,5	0,0893	0,1312	0,2087	0,6355	0,6874	0,6265
30	33,0	0,0918	0,1290	0,2113	0,6714	0,7051	0,6370
40	44,0	0,1812	0,1290	0,2304	0,7250	0,7372	0,6523
50	55,0	0,5208	0,1321	0,2490	0,7569	0,7477	0,6607
70	77,00	0,8701	0,1348	0,2654	0,8006	0,7659	0,6752
100	110,0	0,9055	0,1876	0,2815	0,8359	0,7983	0,7229
130	143,0	0,9258	0,5114	0,3183	0,8631	0,8177	0,7662
160	176,0	0,9466	0,8986	0,4354	0,8940	0,8555	0,8184
200	220,0	0,9700	0,9734	0,6896	0,9413	0,9126	0,8988
250	275,0	1	1	1	1	1	1
300	330,00	1,0176	1,0245	1,0698	1,0773	1,0907	1,0991
350	385,00	1,0350	1,0481	1,1077	1,1319	1,1692	1,1986
400	440,00	1,0448	1,0645	1,1500	1,1740	1,2332	1,2546
450	495,00	1,0552	1,0768	1,1711	1,2087	1,2765	1,3043
500	550,00		1,0895	1,1934	1,2263	1,2958	1,3284
550	605,0				1,2418	1,3108	1,3509
600	600,00				1,2558	1,3339	1,3757

A medição experimental do escoamento do vento para o Experimento II - área complexa com morro isolado assimétrico e três pontos em solo, em túnel de vento considerou ventos com $p=0,11$ e $p=0,23$, em 3D. As medições e a aplicação dos modelos analíticos das normas de

cargas de vento citadas foram normalizados a altura de 275 m, e confrontados mostraram os resultados que seguem nas figuras de 96 a 113, para o morro assimétrico e nas Figuras de 114 a 119, para os três pontos em solo. São apresentados os perfis calculados e medidos para as nove estações situadas na diretriz principal do morro e para os pontos em solo, em conformidade com a locação detalhada nas figuras 75 e 76.

Morro isolado e assimétrico - Ponto 01

Figura 96 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 01, categoria I, $p=0,11$.

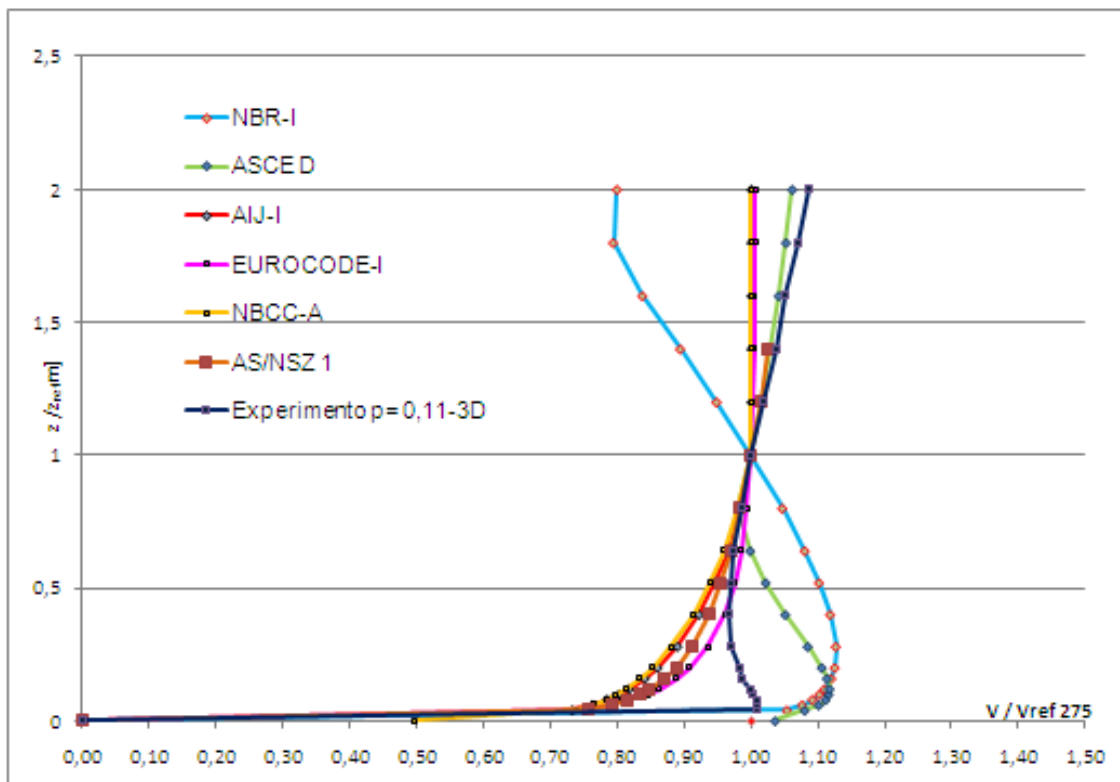
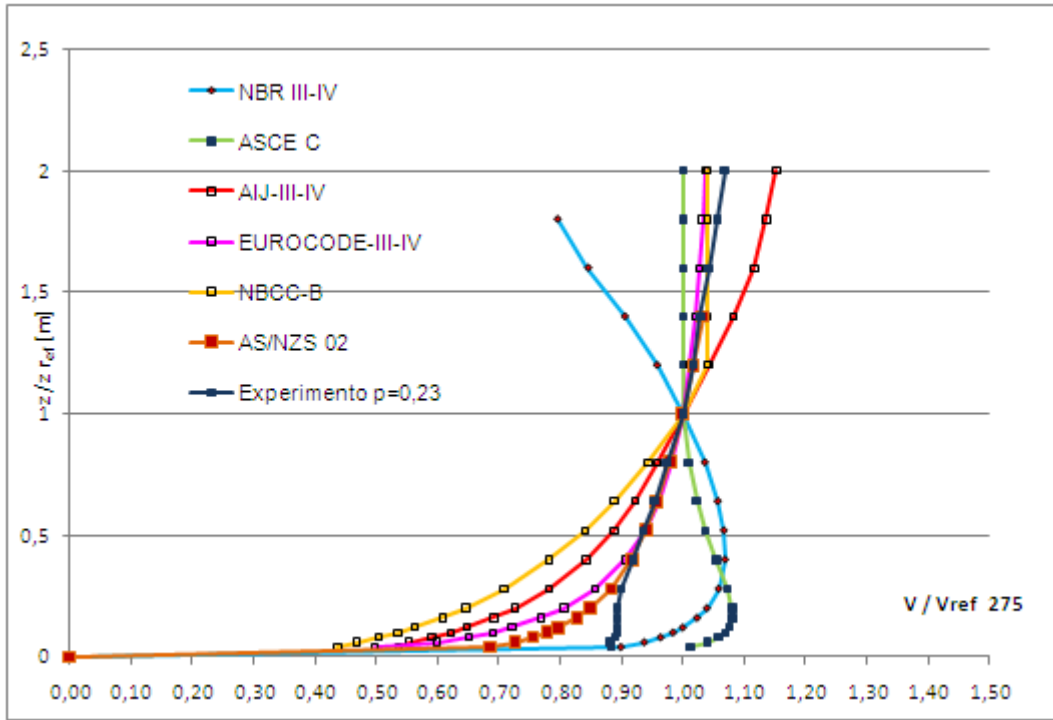


Figura 97 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 01, categorias III-IV, $p=0,23$.



Morro isolado e assimétrico - Ponto 02

Figura 98 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 02, categoria I, $p=0,11$.

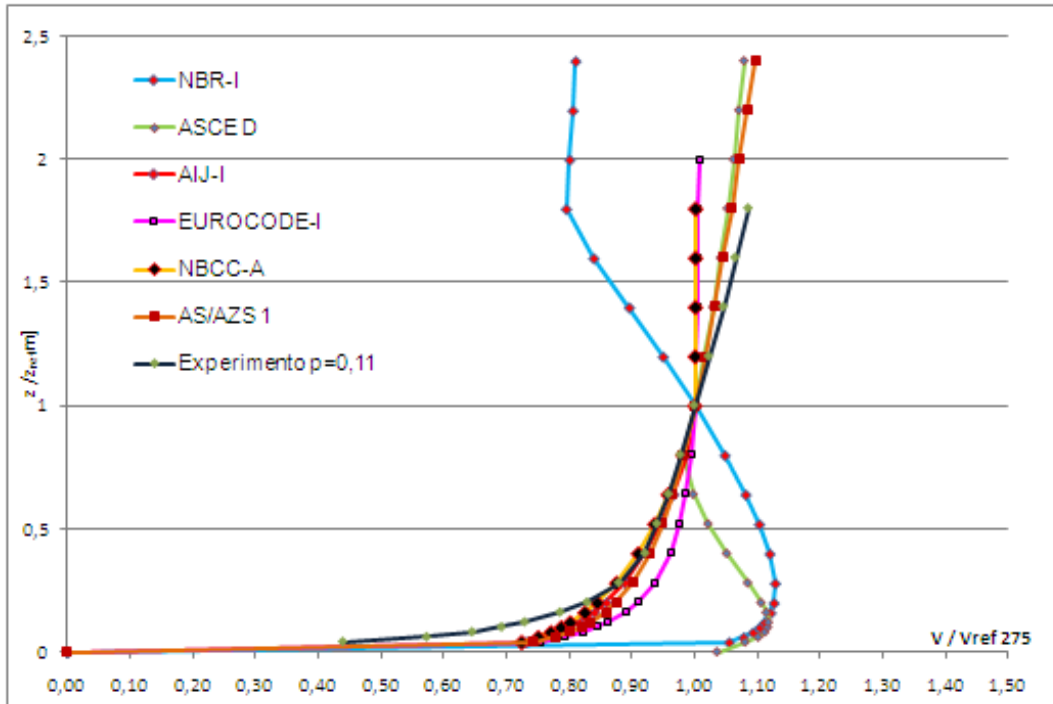
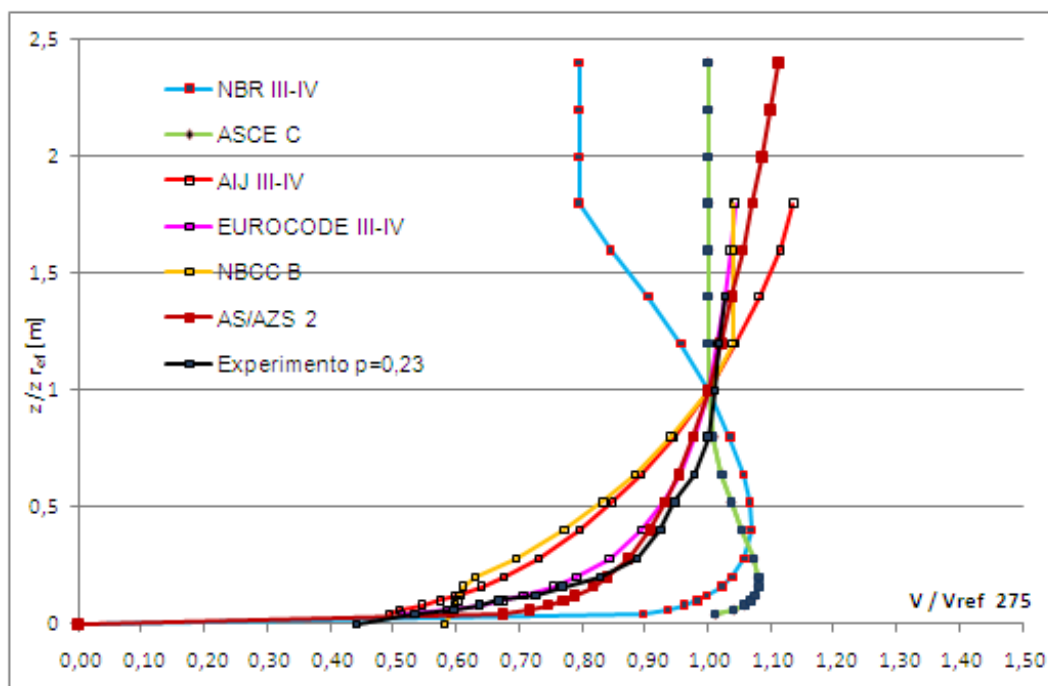


Figura 99 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 02, categorias III-IV, $p=0,23$



Morro isolado e assimétrico - Ponto 03

Figura 100 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 03, categoria I, $p=0,11$.

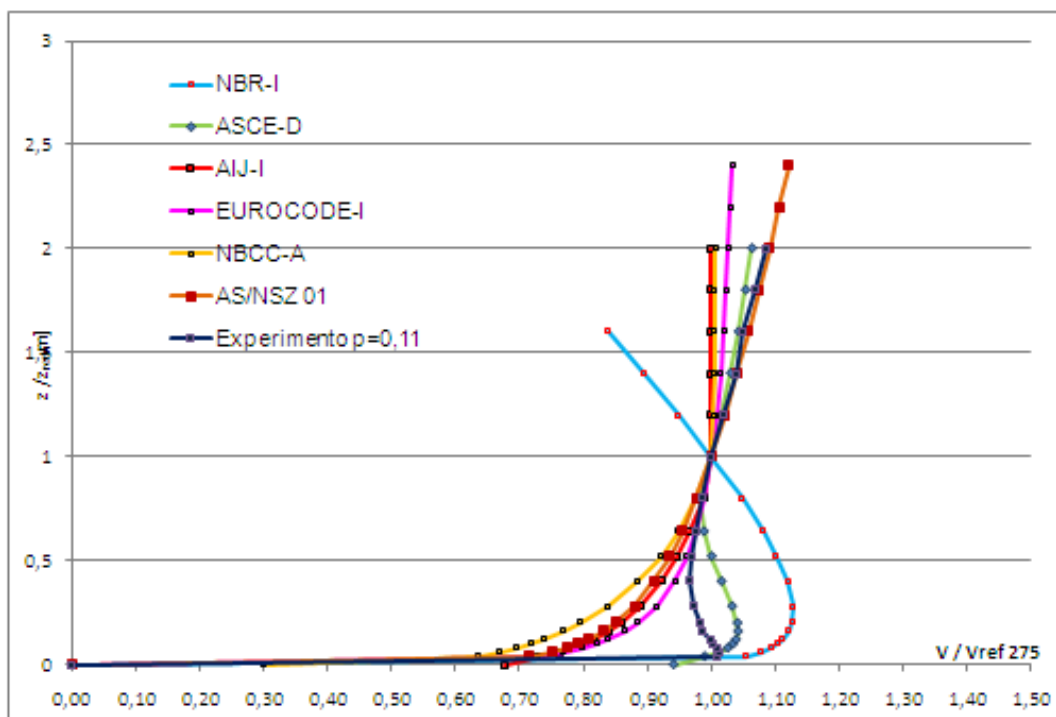
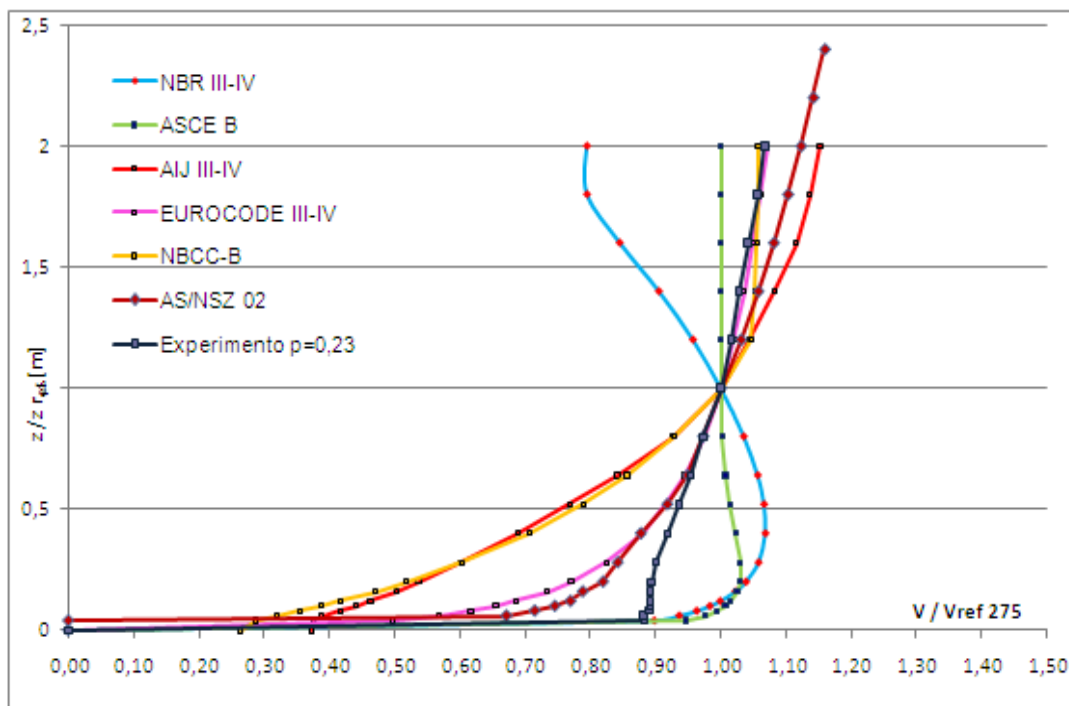


Figura 101 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 03, categorias III-IV, $p=0,23$.



Morro isolado e assimétrico -Ponto 04

Figura 102 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 04, categoria I, $p=0,11$.

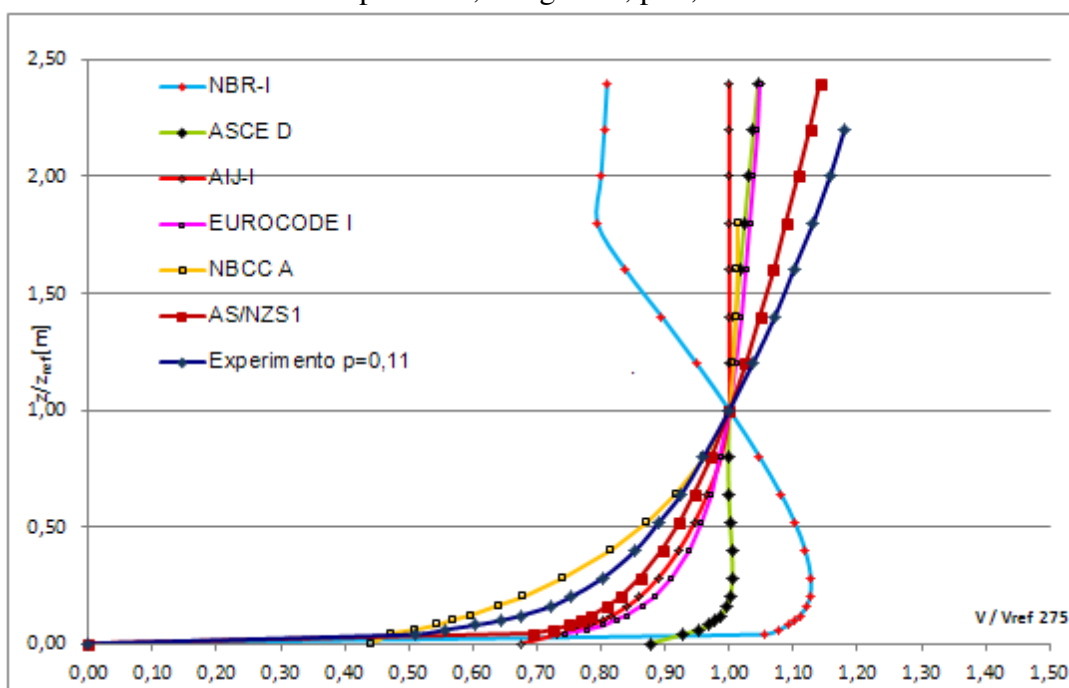
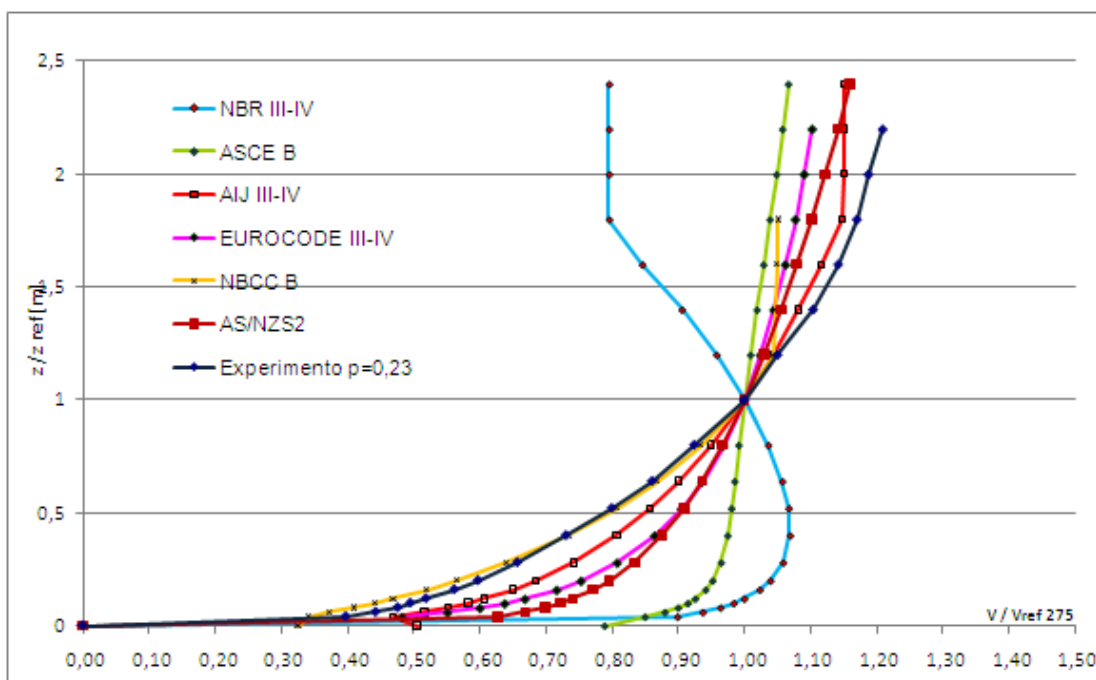


Figura 103 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 04, categoria III-IV, $p=0,23$.



Morro isolado e assimétrico - Ponto 05

Figura 104 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 05, categoria I, $p=0,11$.

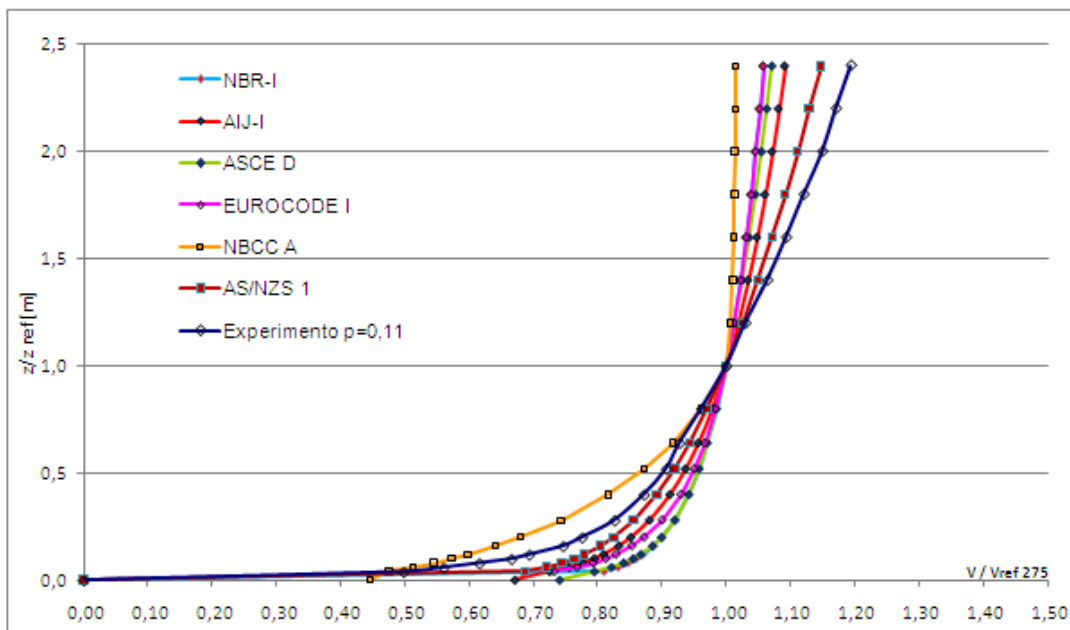
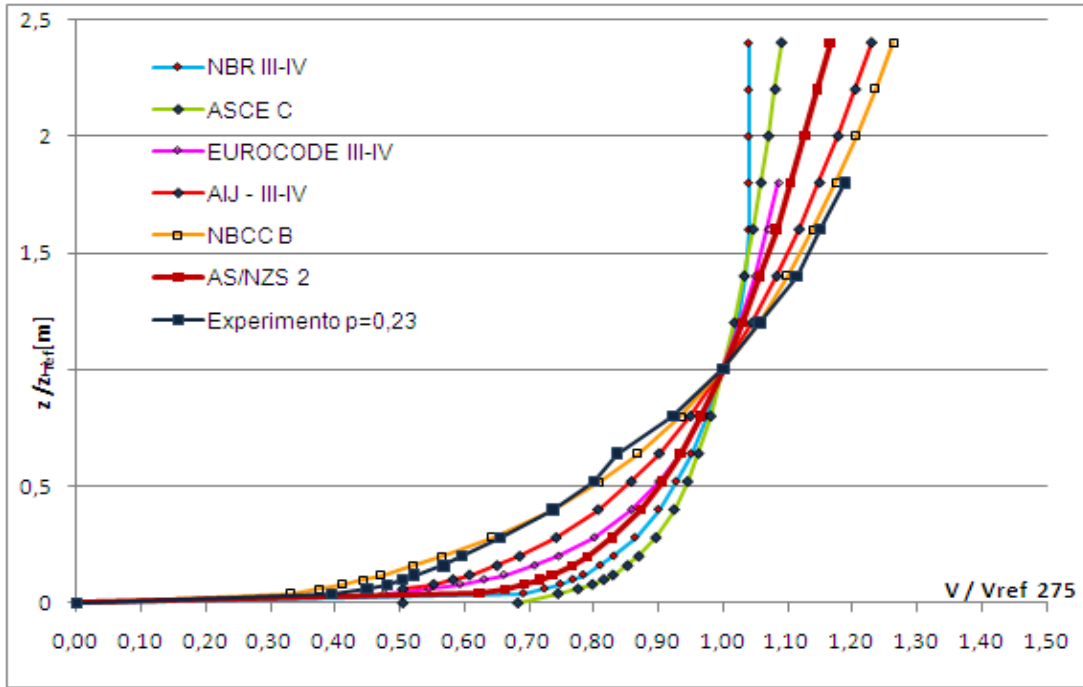


Figura 105 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 05, categoria III-IV, $p=0,23$



Morro isolado e assimétrico - Ponto 06

Figura 106 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 06, categoria I, $p=0,11$.

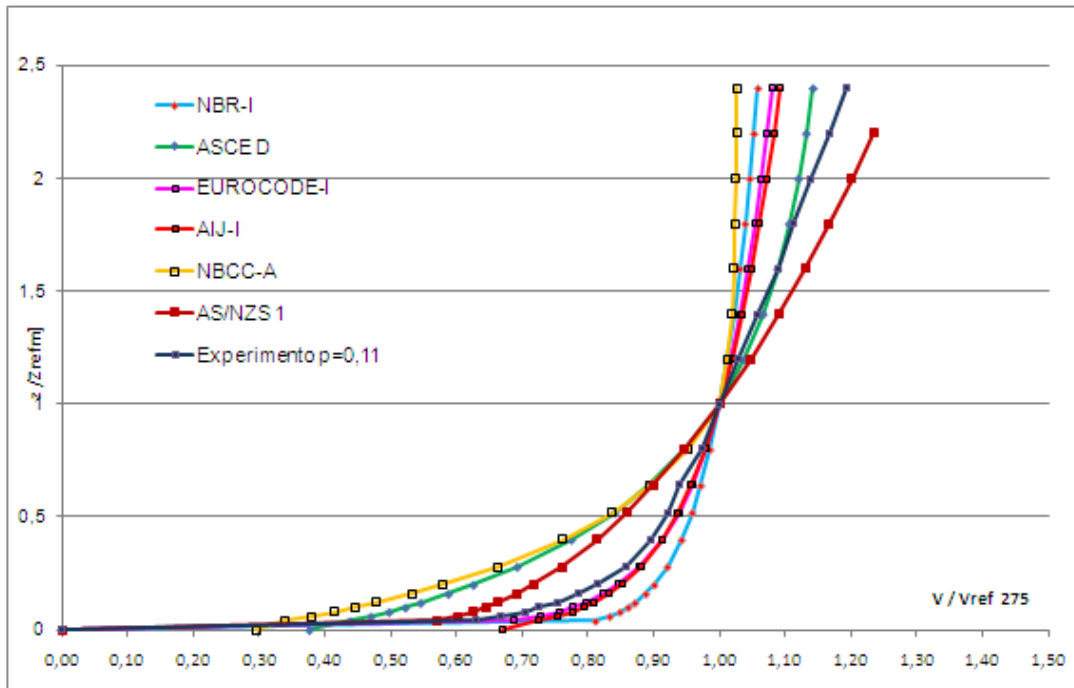
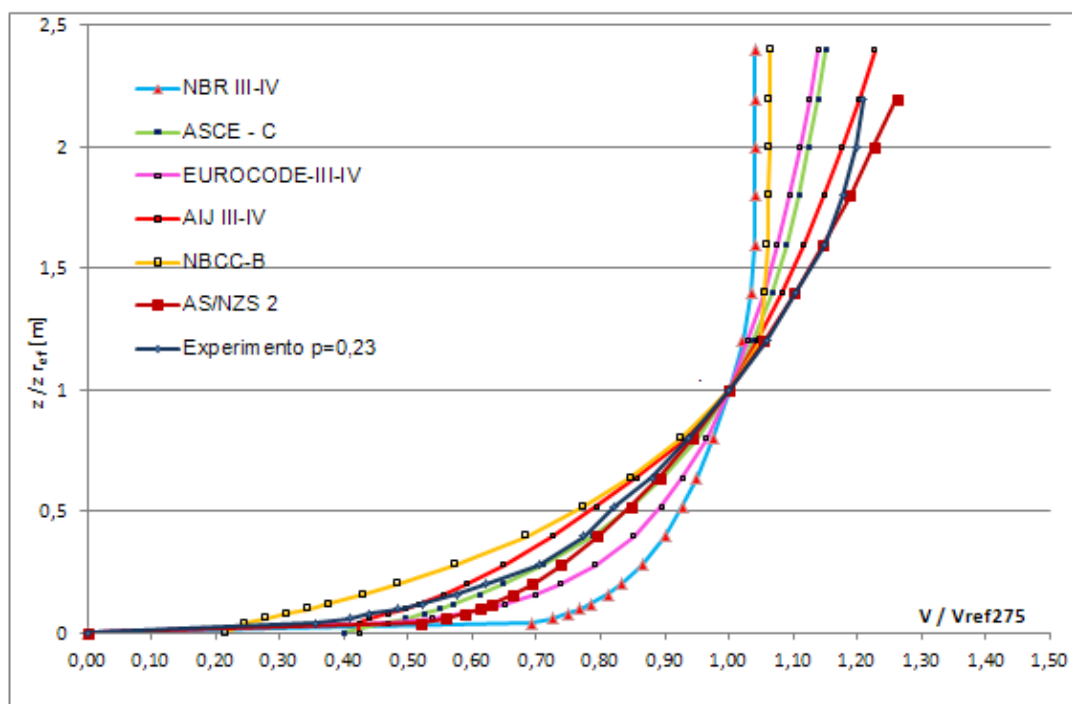


Figura 107 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 06, categorias III-IV, $p=0,23$.



Morro isolado e assimétrico - Ponto 07

Figura 108 – Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 07, categoria I, $p=0,11$.

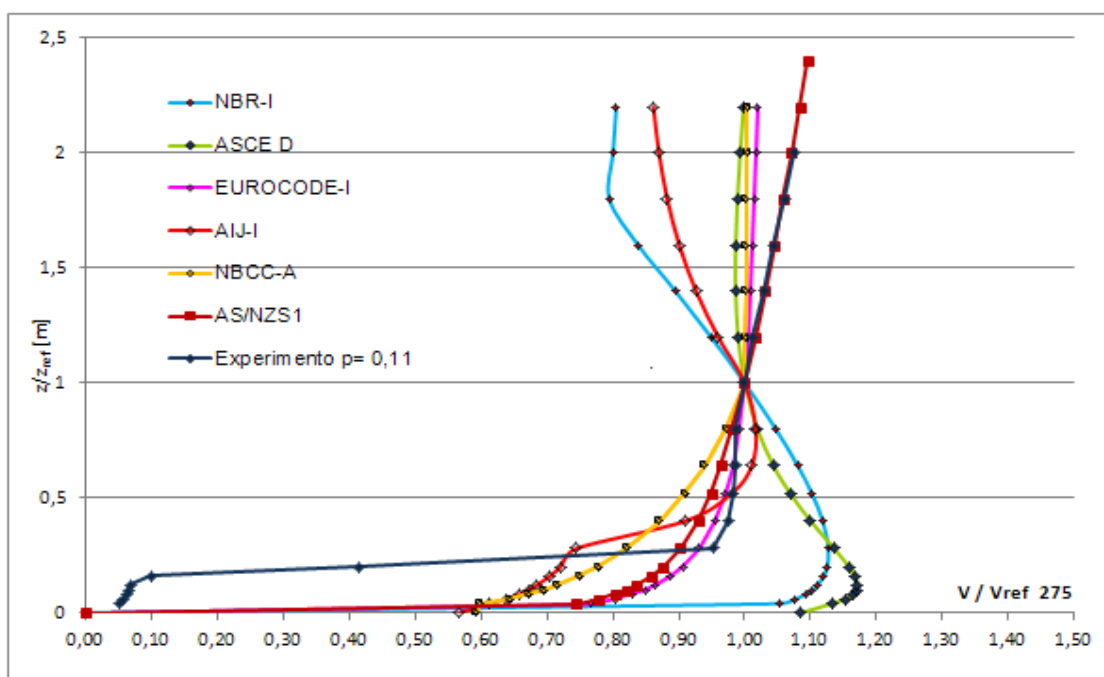
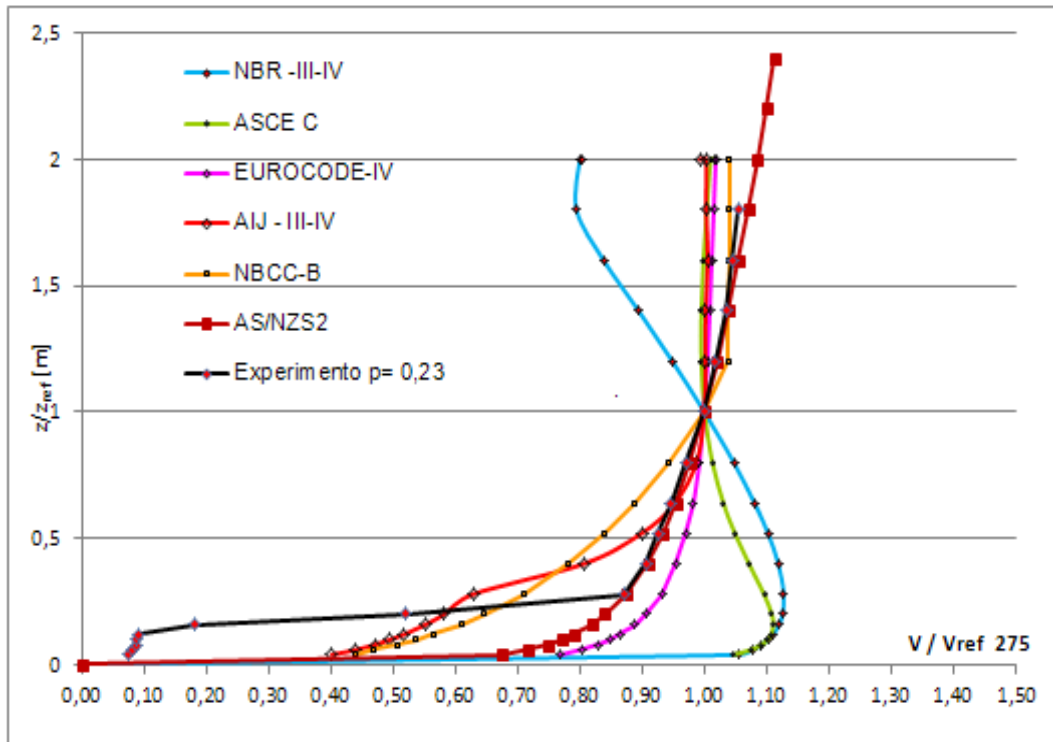


Figura 109 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 07, categorias III-IV, $p=0,23$.



Morro isolado e assimétrico - Ponto 08

Figura 110 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 08, categoria I, $p=0,11$.

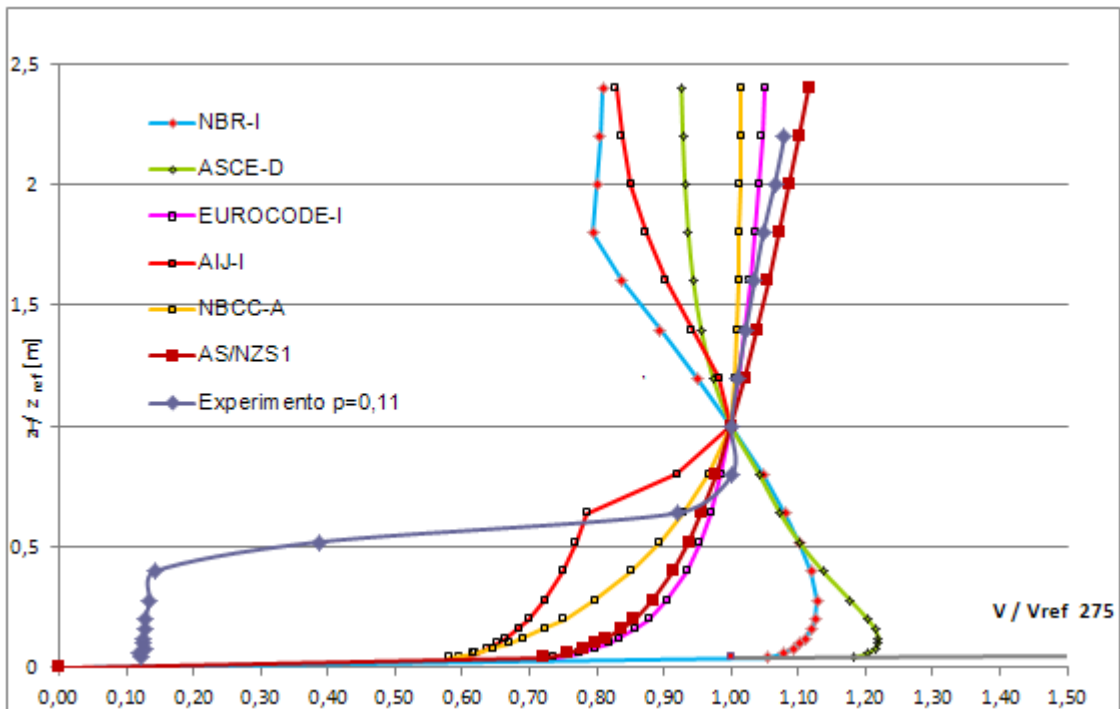
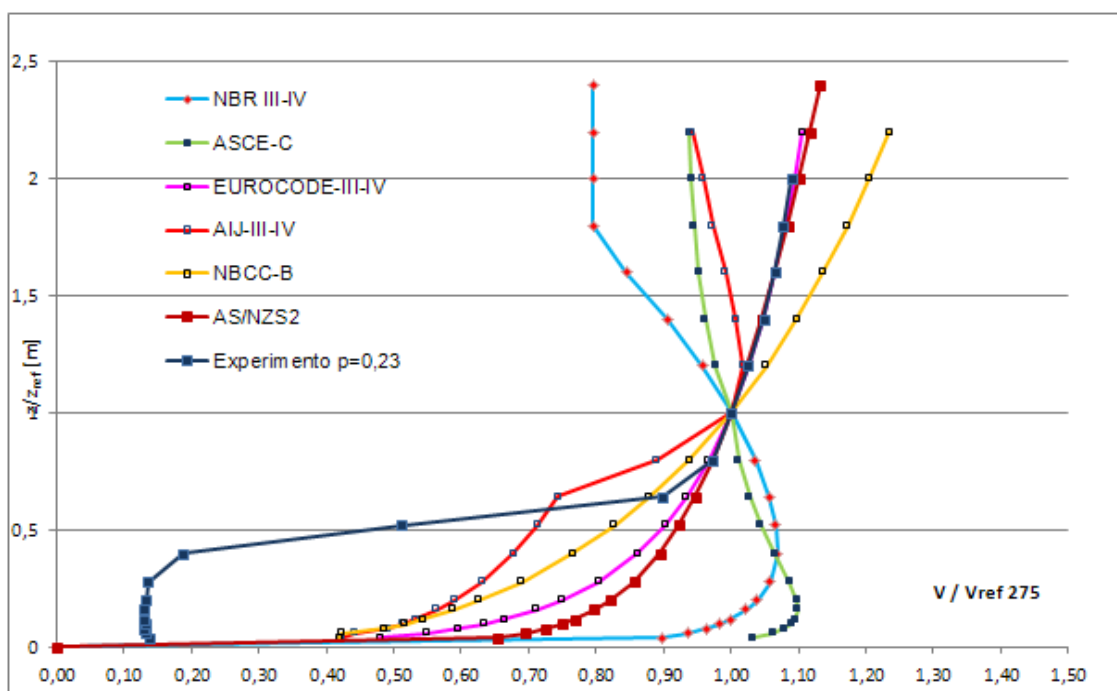


Figura 111 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 08, categorias III-IV, $p=0,23$



Morro isolado e assimétrico - Ponto 09

Figura 112 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 09, categoria I, $p=0,11$

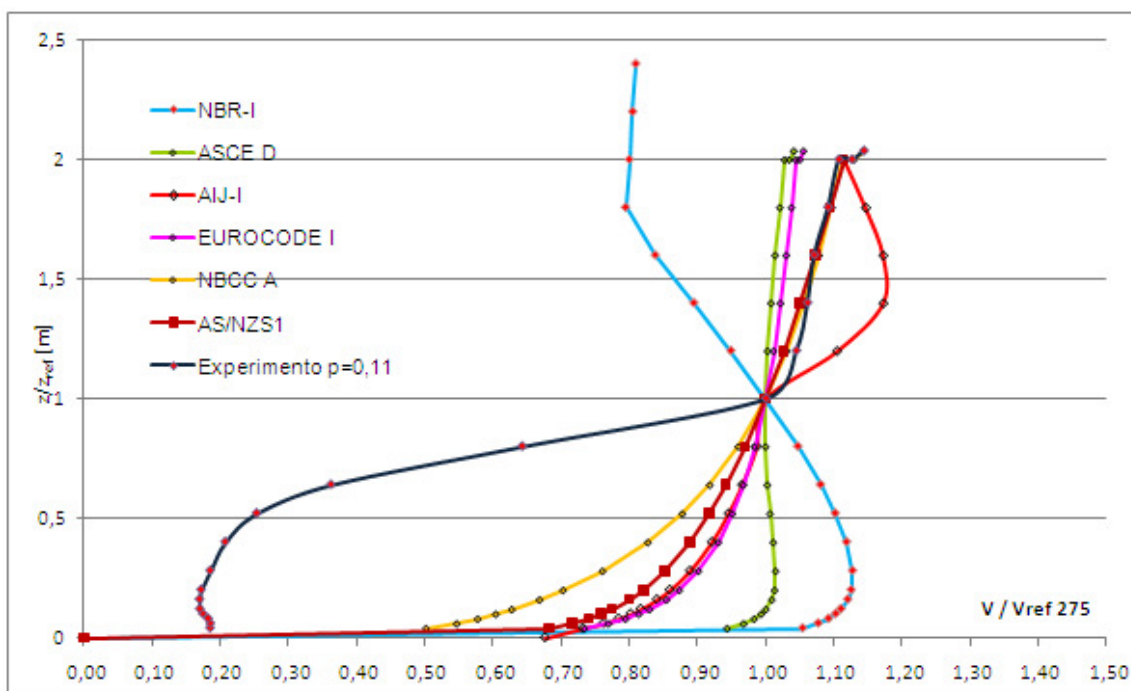
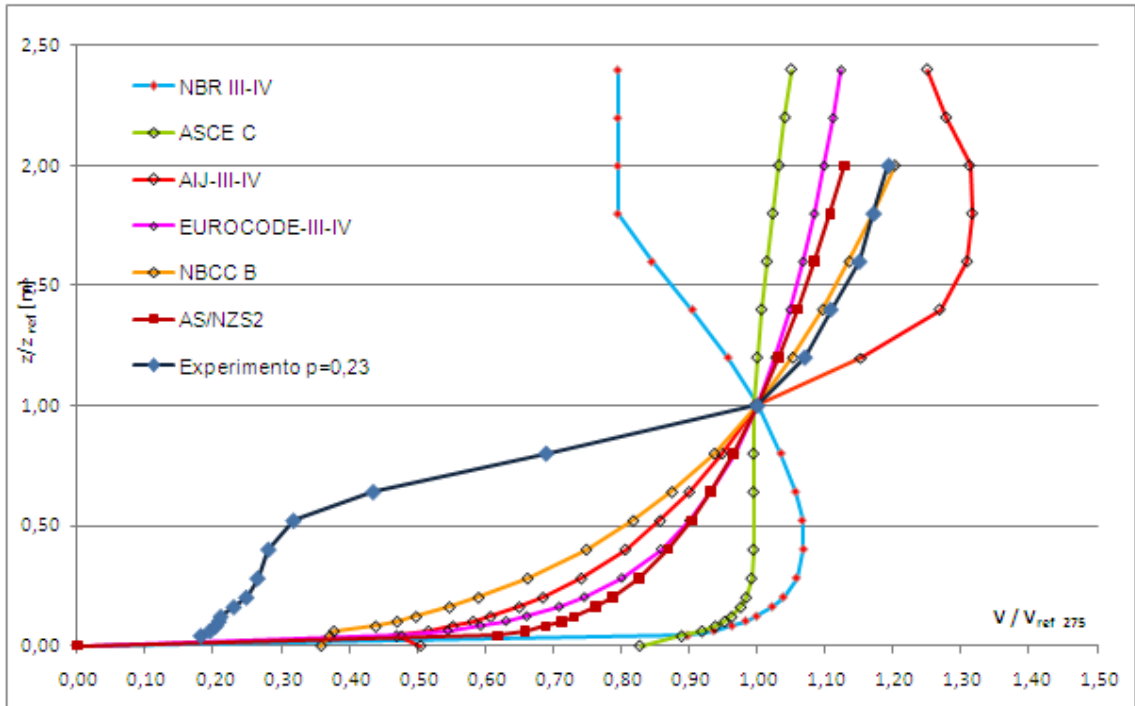


Figura 113 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 09, categorias III-IV, $p=0,23$.



. Pontos em solo - Ponto 10

Figura 114 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 10, em solo, categoria I, $p=0,11$.

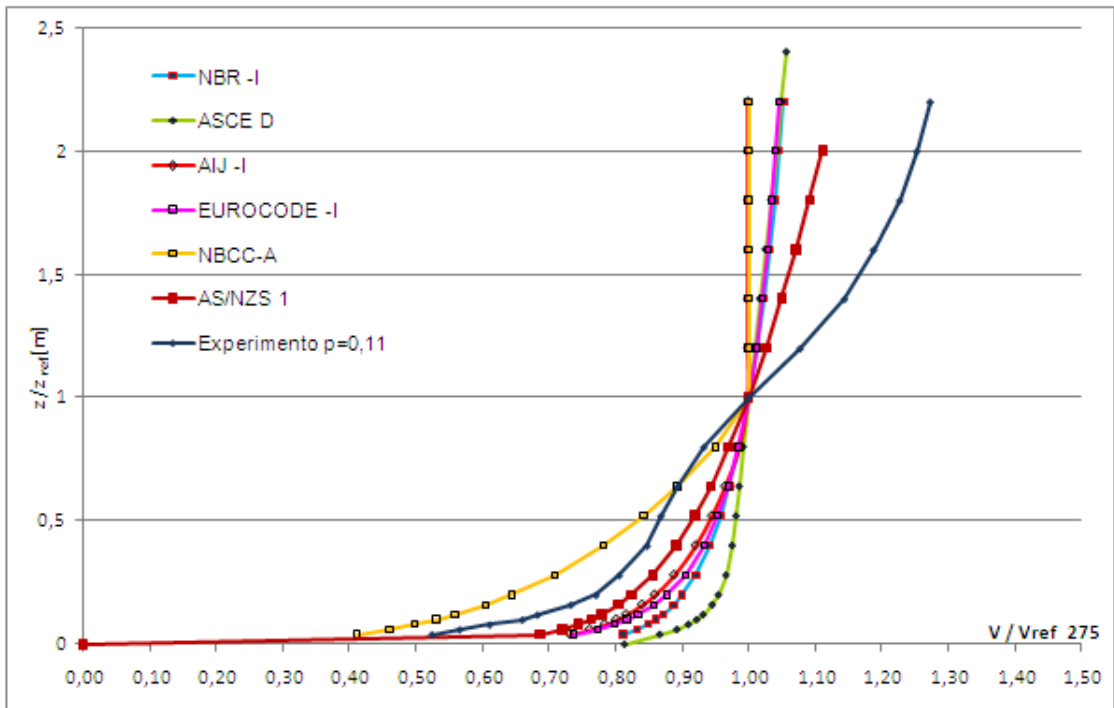
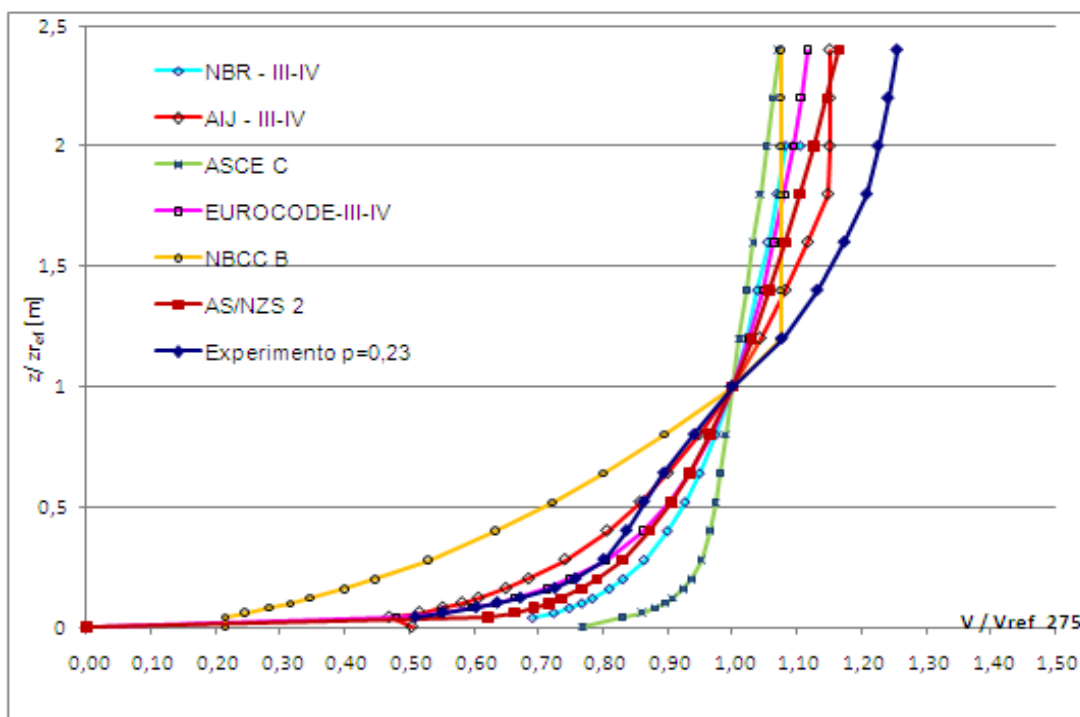


Figura 115 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 10, em solo, categoria III-IV, $p=0,23$.



Ponto em solo - Ponto 11

Figura 116 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 11, em solo, categoria I, $p=0,11$.

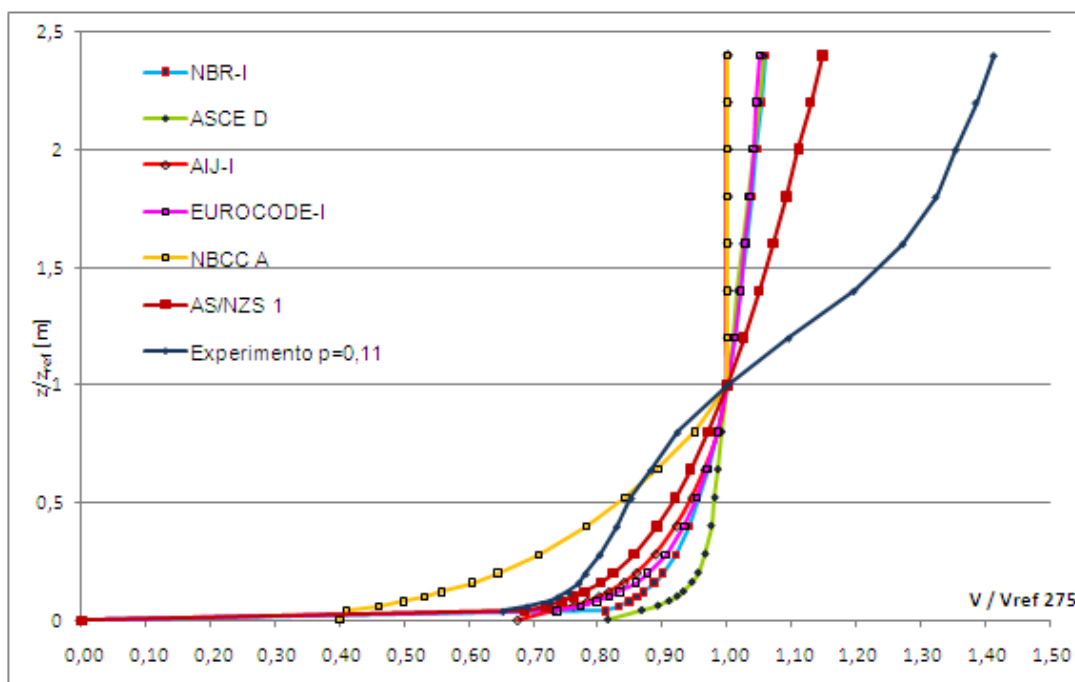
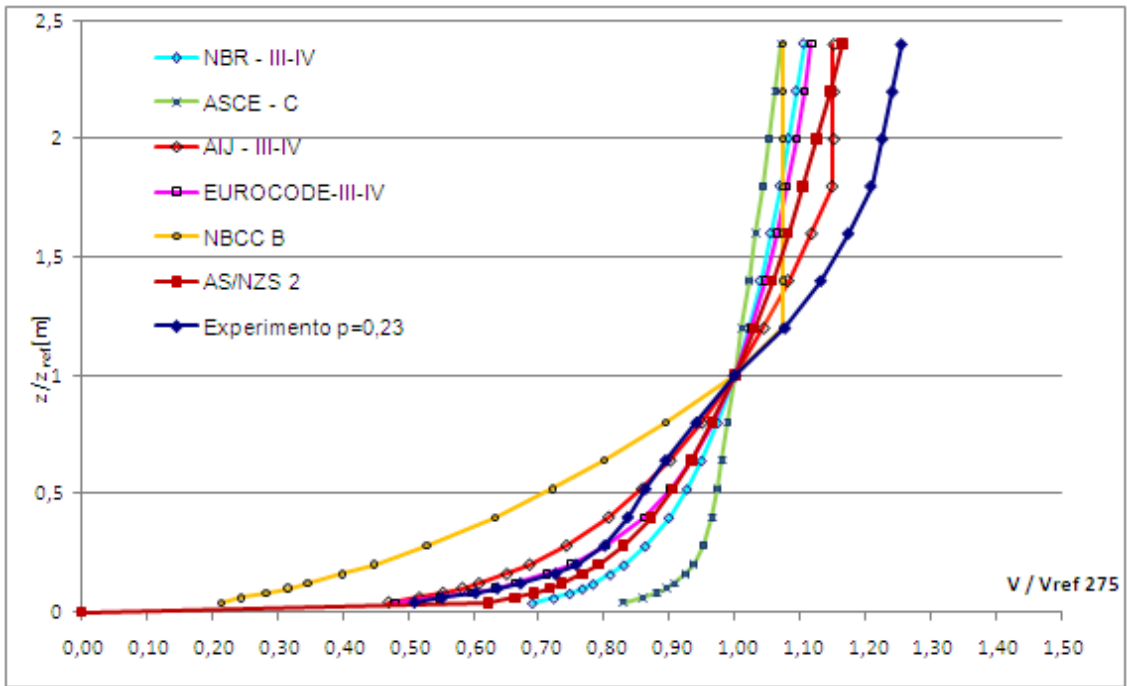


Figura 117 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 11, em solo, categorias III-IV, $p=0,23$.



Ponto em solo - Ponto 12

Figura 118 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 12, em solo, categoria I, $p=0,11$.

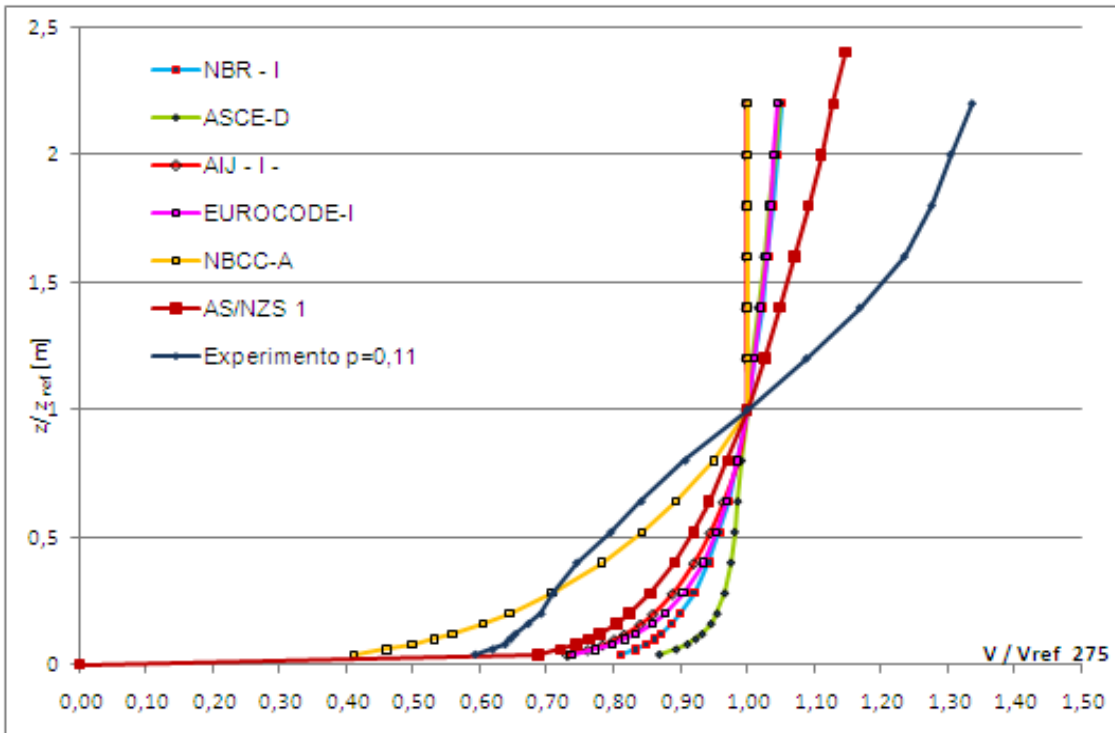
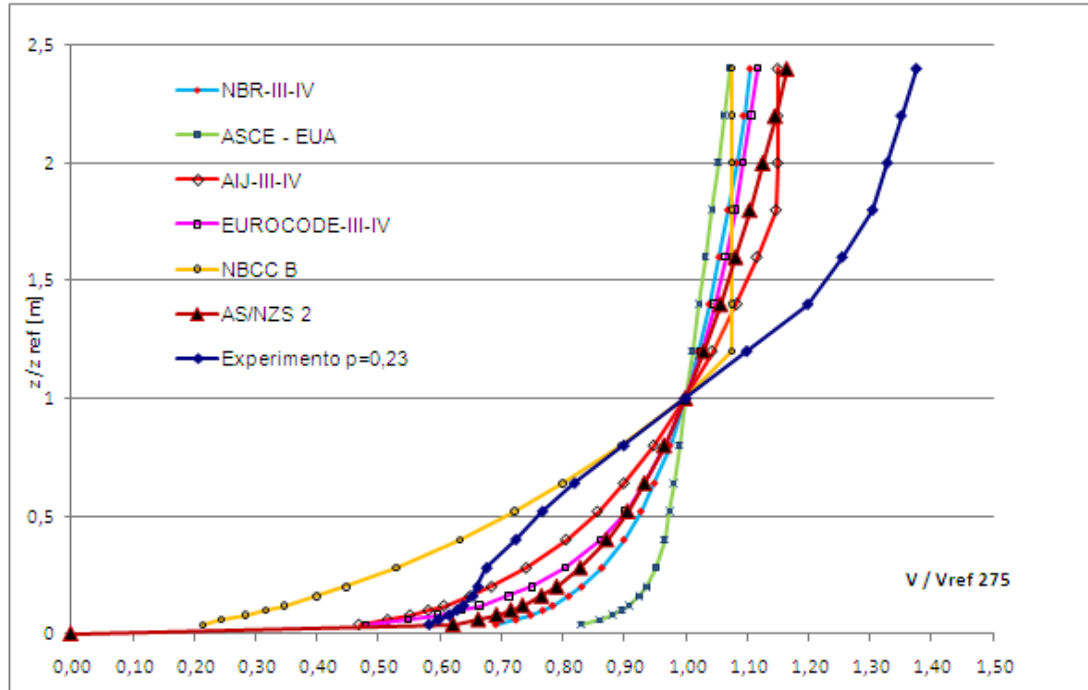


Figura 119 - Aplicação modelos analíticos e medição experimental 3D, ponto 12, em solo, categorias III-IV, $p=0,23$



Para a comparação entre os modelos analíticos elencados, foram feitos ajustes em cada velocidade de referência adotada, de acordo com a duração da velocidade especificada para cada norma, conforme mostrado Tabela 38. Para tanto, foi empregada a Tabela 22 – Velocidade normalizada S_2 da NBR 6123(1988)

Tabela 38 - Duração da velocidade e o tempo de recorrência de cada padrão mencionado.

Norma	Duração da velocidade	tempo recorrência
NBR	3s	50a
AIJ	10 min(600 s)	100a
EUROCODE	10 min(600s)	50a
ASCE	3s	50a
AS/NZS	2-3s em 01 hora	50a
NBCC	01 hora(3600 s)	25a

O Anexo A apresenta os parâmetros, p , z_0 , c_{as} de acordo com o tipo de terreno.

Os Anexos B, C, D, E e F apresentam estudos comparativos extensivos sobre os dados medidos e calculados, conforme descritos a seguir.

Anexo B: perfis de vento 0,11 e 0,23 com as medições experimentais, mostrados nas Figuras 1 a 32 do referido anexo;

Anexo C: perfis de velocidade do vento coletados experimentalmente comparados com as normas analíticas NBR 6123(1988), EUROCODE-CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, ASCE 7-95:2005; AS/NZS:2002 e NBCC:2005 para os Experimentos I e II, Categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D., normalizados a 275 m e a 440 m , mostrados nas Figuras 33 a 64 do referido anexo;

Anexo D: medições experimentais comparadas com as normas analíticas NBR 6123(1988), EUROCODE-CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, ASCE 7-95:2005; AS/NZS:2002 e NBCC:2005 para dois tipos de rugosidade, e para 2D e 3D, sem normalização, mostrados nas Figuras 65 a 79 do referido anexo;

Anexo E: medições experimentais para o cume dos modelos do Experimento I: modelos hipotéticos A, B, C e D - Morros isolados simétricos bi e tridimensionais, mostrados nas Figuras 80 a 83 do referido anexo;

Anexo F: perfis da velocidade de vento calculados e propostos para as normas analíticas NBR 6123(1988), ASCE 7-95:2005 aproximados ao medido em túnel de vento, Figuras 84 a 91 do referido anexo.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSIÇÃO DO MODELO ANALÍTICO

1. A aplicação dos modelos analíticos a um terreno plano: As normas ASCE/SEI 7-05: 2005, NBCC (2005) e AS/NZS (2002) apresentaram perfis coincidentes, assim como os perfis das normas AIJ: 2004 e CEN TC 250: 2002. Por outro lado, a NBR 6123(1988) não foi

coincidente com nenhuma norma, mantendo um perfil a maior que o bloco integrado pelas demais, conforme mostrado na Figura 87 do corpo do texto.

2. Os gráficos das medições nos cumes dos modelos hipotéticos A, B, C e D do Experimento I são mostrados nas Figuras de 80 a 95 do corpo do texto, em 2D e em 3D, para ventos 0,11 e 0,23. As medições dos pontos localizados no morro assimétrico do Experimento II em 3D, são mostradas nas Figuras 96 a 113 do corpo do texto, em 3D, para ventos 0,11 e 0,23.

As comparações entre esses resultados evidenciaram similaridades e diferenças na aplicação dos modelos analíticos para os mesmos pontos referenciados. Examinando-se a partir dos gráficos de valores médios de velocidade do vento normalizado a 275 m a altura “z”, observou-se que essas variações atenderam os detalhamentos pontuais que seguem;

3. Análise da comparação entre os cumes do Experimento I: modelos simétricos A, B, C e D:

3.1 De modo geral, para os quatro cumes dos modelos simétricos A, B, C e D, medidos em 2D e em 3D, com medições normalizadas a 275 m, evidenciaram-se como normas mais conservadoras em relação às medições experimentais coletadas em túnel de vento, os perfis da NBR-I e do ASCE-D, para os dois tipos de vento analisados;

3.1.1 Para o Modelo A, com inclinação de 25° para terreno com menor rugosidade, em medição de 2D evidencia-se a constituição de três blocos: medições mais conservadoras compostas pelo ASCE e pela NBR, os perfis do EUROCODE, da AS/NSZ a da AIJ agregando-se junto ao perfil experimental e o da NBCC a menor do mesmo. Para terreno com maior rugosidade observa-se também as medições mais conservadoras do ASCE e NBR, os perfis do EUROCODE, da AS/NSZ a da AIJ no entorno do experimental e o perfil da NBCC a menor desse em 2D, quanto em 3D. O modelo tridimensional A para $p=0,11$ mostra-se muito semelhante ao bidimensional para este tipo de vento, bem como o tridimensional muito semelhante do bidimensional para vento 0,23;

3.1.2 Para o Modelo B, com inclinação de 32° , para terreno com menor rugosidade, tanto em medições de 2D, quanto em 3D, normalizadas a 275 m, a EUROCODE agrega-se ao bloco dos perfis mais conservadores, integralizado pela NBR e pelo ASCE, a maior que o experimental, tanto em 2D, quanto em 3D. A norma mais próxima do perfil experimental é a AS/NZS. A AIJ aglutina-se junto à NBCC, em um bloco a menor que o experimental. Para terreno com maior rugosidade, a EUROCODE agrega-se ao bloco central integralizado pela

AS/NSZ e pelo perfil experimental, permanecendo as normas a maior desse, NBR e ASCE, nas mesmas posições, bem como as normas a menor do mesmo, AIJ e NBCC, também nas mesmas posições;

3.1.3 Para o Modelo C, com inclinação de 52° ; para terreno com menor rugosidade, tanto em medição de 2D, quanto em 3D, normalizadas a 275 m, a EUROCODE acresce-se ao bloco de perfis mais conservadores, a maior que o experimental, tanto em 2D, quanto em 3D, semelhantemente ao Modelo B para as mesmas condições. Junto ao perfil experimental, constroem-se os perfis da AS/NZS, da AIJ e da NBCC, a partir de $z = 130$ m. Para terreno com maior rugosidade o bloco integralizado pela ASCE e NBR permanece, o EUROCODE agrega-se ao bloco central integralizado pela AS/NSZ, pela NBCC e pelo perfil experimental, restando a AIJ a menor que o mesmo, para 2D e 3D;

3.1.4 Para o Modelo D, com inclinação de 68° , para terreno com menor rugosidade, em medição de 2D normalizadas a 275 m, a Norma Européia acresce-se ao bloco de perfis mais conservadores, a maior que o experimental, semelhantemente aos Modelos B e C para as mesmas condições. Para 3D, acresce-se também a AIJ a esse bloco. Junto ao perfil experimental constrói-se o perfil da AS/NZS, a partir de 80 m, aproximadamente, para 2D e 3D, restando a NBCC a menor, para 2D e 3D. Para terreno com maior rugosidade, o bloco integralizado pela ASCE e NBR permanece a maior que o perfil experimental. O EUROCODE e o AS/NSZ aproximam-se desse perfil e a menor que o experimental situam-se a AIJ e o NBCC, tanto para 2D quanto para 3D.

4. Análise da comparação entre os pontos do Experimento II - Área complexa real

4.1. Análise dos pontos do Experimento II: área complexa integralizada por um morro isolado e assimétrico e três pontos em solo, conforme pontos :96 a 119 do corpo do texto.

4.2 A única norma dentre as analisadas que apresenta rotina de cálculo diferenciada para pontos a sotavento do morro é a AIJ, as demais mantêm as rotinas de cálculo semelhantes a localizações a barlavento, fazendo com que, desta forma, os cálculos definam perfis pares dos que ocorreriam a nesses locais.

Conclusões específicas para medições normalizadas a 275 m, conforme figuras 96 a 119 do corpo do texto:

- Ponto 01: Cume:

As NBR I e ASCE D colocam-se a maior que o perfil experimental. Em um bloco único postam-se a NBCC A, a AS/NSZ 1, a EUROCODE. A AIJ-I situa-se a menor que o perfil experimental, até 220 m, aproximadamente. A partir desta altura, as citadas normas unem-se ao perfil experimental para o vento 0,11.

No vento 0,23 permanece a ASCE e NBR III-IV a maior que o experimental. Agregam-se ao perfil experimental, em um bloco central, o EUROCODE III-IV e a AS/NSZ 02. A NBCC B junta-se ao bloco central, a partir de 165 m. Constroem-se a menor que o experimental a AIJ III-IV e a NBCC B, até 165 m, conforme Figuras 96 e 97 do corpo do texto;

- Ponto 02:

Para o perfil 0,11, agregam-se no entorno do perfil experimental todas as normas à exceção da NBR-I, que se mostra a maior do perfil experimental. Para o perfil 0,23 juntam-se ao perfil experimental, o EUROCODE III-IV e a AS/NSZ 2. A maior do experimental encontra-se a NBR III-IV e a menor do experimental, colocam-se a NBCC B e AIJ III-IV, conforme Figuras 98 e 99 do corpo do texto;

- Ponto 03:

Para o vento 0,11 constrói-se a menor, até 200 m, o bloco integralizado pela EUROCODE I, NBCC A, AS/NSZ 1 e AIJ 1. A partir da altura citada, essas normas juntam-se ao perfil experimental. A NBR I e a ASCE D mostram-se a maior que o citado perfil.

Para o vento 0,23 os perfis do AS/NSZ 2 e EUROCODE III-IV constroem-se muito coincidentes e a menor que o experimental até a altura de 165 m, para então unirem-se a esse. A maior que o perfil experimental, seguem a ASCE C e a NBR III-IV e a menor que o experimental, a AIJ III-IV e a NBCC B, conforme Figuras 100 e 101 do corpo do texto;

;

- Ponto 04:

Para o perfil 0,11 unem-se em um bloco a AS/NSZ 1, a EUROCODE I e a AIJ I, a maior do perfil experimental. Permanecem muito próximas a ASCE D e a NBR I, sendo a NBCC A a mais próxima do perfil experimental, entretanto, a menor desse. Em uma rugosidade maior a NBCC B coincide integralmente com o perfil experimental, restando a maior desse, todas as demais normas. A ASCE C e a NBR constituem um bloco singularizado, conforme Figuras 102 e 103 do corpo do texto;

- Ponto 05:

Para o perfil 0,11 unem-se em um bloco único a AS/NSZ 1, a EUROCODE I, a AIJ I, a ASCE D, próximas ao perfil experimental. A maior desse constrói-se a NBR-I e a menor, a NBCC A.

Para o vento 0,23 a NBCC B é exatamente coincidente com o experimental em toda a altura. A AIJ III-IV, o EUROCODE III-IV, a AS/NSZ 2 e a ASCEC constroem-se a maior que o experimental. A NBR III-IV estabelece-se distanciada das demais, a maior que o perfil experimental, conforme Figuras 104 e 105 do corpo do texto;

- Ponto 06:

Em perfil semelhante ao ponto 05, para os dois ventos, 0,11 unem-se em um bloco todas as normas junto ao perfil experimental conforme Figuras 106 e 107 do corpo do texto;

.

- Pontos 07, 08 e 09:

A única norma que tenta reproduzir o fenômeno da esteira do vento que se evidencia nos pontos a sotavento do morro 07, 08 e 09 é a AIJ. As demais normas desconsideram o comportamento diferenciado do escoamento que aí se desencadeia. Conforme o exposto pode-se afirmar que as normas estudadas, à exceção da AIJ não constituem rotinas de cálculo diferenciadas de modo a traduzir o fenômeno da esteira de turbulência do vento a sotavento do morro, para os dois tipos de vento, conforme Figuras 108 e 113 do corpo do texto;

- Ponto 10:

Para o perfil 0,11 unem-se em um bloco a AS/NSZ 1, a EUROCODE I, a AIJ I, a ASCE D, a NBR-I e a ASCE D, próximas ao perfil experimental, a maior deste. A norma mais próxima do experimental é a AS/NSZ 1. A menor constrói-se a NBCC A.

Para o vento 0,23 mostram-se em um bloco integralizado com o experimental a EUROCODE III-IV, a AS/NSZ 2, a ASCEC, a NBR III-IV, a AIJ III-IV. A menor desse a NBCC B, conforme Figuras 114 e 115 do corpo do texto;

- Ponto 11:

Para o vento 0,11 unem-se em um bloco a AS/NSZ 1, a EUROCODE I, a AIJ I, a ASCE D, a NBR-I e a ASCE D, próximas ao perfil experimental, entretanto, a maior desse até 275 m. A norma mais próxima do experimental é a AS/NSZ 1. A menor que o experimental constrói-se a NBCC A.

Para o vento 0,23 mostram-se em um bloco integralizado com o experimental a EUROCODE III-IV, a AS/NSZ 2, a ASCEC, a NBR III-IV, a AIJ III-IV. A menor desse a NBCC B, conforme Figuras 116 e 117 do corpo do texto;

- Ponto 12:

A construção dos perfis analíticos para o ponto 12 é semelhante ao 11. Para o vento 0,11 unem-se em um bloco a AS/NSZ 1, a EUROCODE I, a AIJ I, a ASCE D, a NBR-I e a ASCE D, entretanto a maior que o perfil experimental. A NBCC A é a norma que mais se aproxima do mesmo.

Para o vento 0,23, a EUROCODE III-IV, a AS/NSZ 2, a NBR III-IV, a AIJ III-IV unem-se em bloco a maior que o experimental, estando a ASCEC apartada e a maior e a NBCC B a menor que o experimental, conforme Figuras 118 e 119 do corpo do texto;

.

4.3 Análise do Anexo B : Estudo comparativo entre os perfis de vento $p=0,11$ e $p=0,23$ e as medições experimentais nos cumes dos morros simétricos A, B, C e D do Experimento I e os pontos medidos do Experimento II.

Os gráficos das medições experimentais comparadas dos cumes dos modelos simétricos A, B, C e D com os perfis dos ventos $p=0,11$ e $p=0,23$, analisadas tanto bidimensionalmente quanto tridimensionalmente, mostram que não há coincidência entre os perfis analisados até, aproximadamente 400 m acima do solo, tanto bidimensional quanto tridimensionalmente. Registra-se a velocidade incremental do vento no cume dos morros, conforme Figuras 1 a 8 do Anexo B;

Para os pontos medidos do morro assimétrico do Experimento II mostraram que não houve convergência entre as medições para o ponto 1 tanto para vento $p=0,11$ quanto para $p=0,23$ conforme figuras 9 e 10 do Anexo B. Para os pontos de 2 a 6 situados a barlavento do morro assimétrico do experimento 2, houve convergência entre os dois perfis comparados conforme as figuras 11 a 20. Para os pontos 7 a 9 não houve convergência em função da presença da esteira do vento, conforme identificado nas figuras 21 a 26. Para os pontos em solo evidenciou-se coincidência para o ponto 10, para os dois ventos $p=0,11$ e $p=0,23$. Para os demais pontos houve uma proximidade, mas não convergência entre os perfis em função do efeito do entorno, conforme figuras 27 a 32;

4.4 Análise do ANEXO C: perfis de velocidade do vento coletados experimentalmente comparados com as normas analíticas: NBR 6123(1988), EUROCODE-CENTC 250:2002, AIJ:2004, ASCE 7-95:2005, AS/NZS:2002 e NBCC:2005 para modelos A, B, C e D do Experimento I e Experimento II, normalizados a 275 m e 440 m;

As medições tomadas nos cumes dos modelos hipotéticos simétricos A, B, C e D em 2D e 3D do Experimento I e da área complexa integrante do Experimento II em 3D, comparados aos perfis de vento com menor rugosidade, $p=0,11$ e com maior rugosidade, $p=0,23$ mostradas nas Figuras de 33 a 58 do Anexo C evidenciaram que os perfis analíticos, em geral, não acompanharam os experimentais, especialmente na identificação da velocidade incremental de vento. De modo geral os perfis analíticos são geralmente maiores que os experimentais. As normas que mostraram-se mais conservadoras foram a NBR-6123 e ASCE para o modelos A, B e ASCE e as normas NBR, ASCE, EUROCODE para os modelos C e D, conforme figuras 33 a 40;

ExperimentoII-área complexa real:

Para ponto 01 do morro assimétrico do Experimento II não houve convergência entre a aplicação dos modelos analíticos, conforme figuras 41 e 42;

Para os pontos 02, 03, 04, 05, 06, situados a barlavento do morro mostraram a maior convergência entre os perfis 0,11 e 0,23 com os experimentais, conforme figuras 43 a 52. As Figuras 49 e 50 relativas ao ponto 05 e Figuras 51 e 52 relativas ao ponto 06 mostram a maior convergência para o tipo de comparação normalizada;

Nos pontos 07, 08, 09, localizados a sotavento do morro, não houve convergência devido ao efeito esteira do vento.

Os pontos 10, 11, 12, Figuras 59 a 64 mostraram convergência entre a aplicação das normas, entretanto, não houve coincidência com as medições experimentais;

4.5 Análise Anexo D: comparação entre os perfis construídos e os medidos para os cumes dos modelos simétricos A,B,C e D, sem normalização.

Evidencia-se a tendência de os mesmos serem construídos com valores maiores que os experimentais. Especificamente, pode-se detalhar como segue:

Tabela 37 Velocidades médias experimentais para os cumes dos modelos simétricos.

ventos	Modelos do Experimento I			
	Modelo A - 25°	Modelo B - 32°	Modelo C - 52°	Modelo D - 68°
0,11-2D	31m/s	31 m/s.	28 m/s	32 m/s
0,23-2D,	27 m/s	24 m/s,	24 m/s	26m/s
0,11-3D	19 m/s	20 m/s	18 m/s	20 m/s
0,23 -3D,	18 m/s	20 m/s,	15 m/s	18 m/s

4.5.1 Modelo A: Os perfis mais conservadores referem-se aos da NBR-I e do ASCE D. Sobrepostos ao perfil experimental se encontram os perfis do NBCC, EUROCODE III-IV, AIJ I e III-IV, AS/NSZ 1 e 2. Os perfis mais conservadores referem-se aos da NBR-I ASCE D nesta ordem, em velocidades médias de 50 m/s. Os demais perfis mostram-se em um bloco central, com velocidades médias na ordem de 35 m/s entre os dois limites, medições experimentais, e os mais conservadores citados;

4.5.2 Modelo B: Os perfis mais conservadores referem-se aos da NBR-I ASCE D e EUROCODE I, nesta ordem, em velocidades médias de 40 m/s. Os demais perfis mostram-se

em um bloco central, com velocidades médias na ordem de 35 m/s entre os dois limites, medições experimentais, e os mais conservadores citados. Os Modelos A e B tem uma grande similaridade;

4.5.3 Modelo C: Os perfis mais conservadores referem-se aos da NBR-I e do ASCE D, seguido da NBR III-IV, EUROCODE I, ASCE C e NBCC A. Aglutinam-se em torno dos experimentos o AS/NSZ , AIJ III-IV. Entre os dois limites inserem-se os demais perfis;

4.5.4 Modelo D: Os perfis mais conservadores referem-se aos da NBR-I e do EUROCODE I, em velocidades médias de 45 m/s a 55 m/s, seguidos do ASCE D, nesta ordem. No outro limite, o perfil analítico EUROCODE III-IV se constrói a uma distancia mais próxima dos experimentais, seguido pelos demais perfis que se mostram em um bloco central integralizado entre os dois limites, medições experimentais e os perfis mais conservadores citados, com velocidades médias na ordem de 40 m/s;

4.5.6. Analisando-se especificamente o comportamento das medições experimentais no cume dos morros simétricos conforme o Anexo E verifica-se que os perfis 0,11/3D e 0,23/3D seguem a mesma tendência, qual seja os dois perfis iniciam em torno de 25 m/s , onde o perfil 0,11/3D constrói-se verticalmente com esta velocidade e o perfil 0,23/3D constrói-se inclinado até chegar a 600 m na ordem de 27 a 30 m/s. Enquanto a velocidade do perfil 0,11/3D permanece, a velocidade que o perfil 0,23/3D chega a 600 m aumenta com a inclinação do morro;

Por outro lado, a construção dos perfis 2D evidenciou variabilidade para as quatro inclinações de morros simétricos. Para 25° o perfil inclinado do p=0,23/2D transpassa o perfil vertical 0,11/2D. Esse perfil mantém-se a 30 m/s para inclinações de 25° e 32°. Ocorrendo uma substancial alteração a 52°, quando 0,23/2D constrói-se a 30 m/s e o perfil 0,11/ 2D eleva-se a 28 m/s encontrando-se com o perfil 0,23/ 3D;

5. Proposição do Fator Topográfico testado de aproximação do modelo analítico ao experimental:

Com o objetivo de pesquisar as diferenças evidenciadas nas duas ferramentas empregadas nesta pesquisa, quais sejam, modelos analíticos e experimental, no que se refere ao calculo da carga de vento em cenários complexos, verificadas através do espaçamento entre os perfis de velocidade de vento, calculados e medidos em túnel de vento, passamos a examinar as

formulações de cálculo dos fatores topográficos intrínsecos ao cálculo das velocidades características do vento para os cumes das inclinações dos modelos analisados. Considerando-se os modelos ensaiados, as normas que mais se aproximaram do perfil experimental na maioria dos ensaios foram a AIJ e o EUROCODE. Desta forma, o estudo examinará o fator topográfico de aproximação dos Modelos Analíticos mais conservadores ao modelo experimental. Os modelos analíticos que se mostraram mais conservadores na maioria dos pontos tanto em modelos simétricos quanto assimétrico, comparativamente as duas categorias examinadas, menor e maior rugosidade, categorias I e III-IV e para 2D e 3D foram o Modelo Americano e o Modelo Brasileiro. Nas mesmas condições, o Modelo Canadense evidenciou-se subdimensionado na confrontação da maioria dos cumes medidos.

5.1 Modelo USA-ASCE

Com foco no fator topográfico K_{zt} , foram pesquisados valores para o multiplicador inserido no parâmetro k_1 inserto ao fator K_{zt} empregado no dimensionamento da velocidade característica do vento em terrenos complexos. Para as categorias examinadas, Categorias I e III-IV e inclinações topográficas da pesquisa, 25°, 32°, 52° e 68° - morros simétricos e 34° para morro assimétrico, considerando-se os valores de " z_g " da NBR, evidenciaram-se como limítrofes, para que o perfil analítico se aproximasse ao máximo do experimental, não ultrapassando o mesmo, os valores para o cálculo do valor da velocidade incremental do vento - k_1 constantes na Tabela 39, conforme construção perfis experimentados mostrados nas Figuras 84 a 91 constantes Anexo F. Os valores encontrados para os modelos foram muito próximos, de modo a permitir a consolidação dos mesmos por categoria do terreno.

Tabela 39 - Parâmetros da velocidade incremental do vento sobre Morros-ASCE

Forma Morro	Categoria D		Categoria C	
	$K_1(d/L_s)$		$K_1(d/L_s)$	
	valor original	valor testado	valor original	valor testado
morros simétricos	1,55	1,35	1,45	1,25

Onde:

k_1 =parâmetro para o cálculo da velocidade incremental do vento sobre morros e taludes

d =altura do morro;

L_s =comprimento do morro na meia altura do mesmo

Os multiplicadores experimentados constantes na Tabela 39 propõem a maior proximidade do Modelo Analítico ao Experimental comparativamente àqueles constantes na Tabela 22, categorias D e C empregados para o cálculo do termo $K1(d/Ls)$ incluso no fator Topográfico e são mostrados no Anexo F nas Figuras 84 a 91 desse anexo.

5.2 Modelo Brasileiro

Com o mesmo objetivo foram pesquisados valores para o multiplicador inserido no fator S_1 empregado para o cálculo da velocidade característica do vento em morros. De acordo com os valores testados para inclinações entre 25° e 68° , para as duas categorias de terreno, Categorias I e III-IV, para as alturas de morros consideradas, evidenciaram-se como próximas de modo o perfil analítico se aproximasse ao máximo do experimental, os valores para “x” constantes na Tabela 40, que atendem a equação 96, conforme construção dos correspondentes perfis mostrados nas Figuras 84 a 91 constantes Anexo F.

$$S1(z)=1,0+(2,5-z/d)* x \geq 1 \quad \text{equação 96}$$

Tabela 40 - Valores dos multiplicadores vigentes e testados para multiplicador “x” do fator topográfico segundo NBR

Inclinação morro/categoria terreno	Categorias I III-IV	
	valor original	valor testado
25° morro smétrico A	0,31	0,15
32°-morro simétrico B	0,31	0,18
34°-morro assimétrico	0,31	0,18
52° morro simétrico C	0,31	0,22
68° morro simétrico D	0,31	0,27

O Anexo F compõem a construção dos perfis analíticos com a aplicação dos valores experimentados para a melhor aproximação do perfil analítico ao experimental nas Figuras 84 a 91.

8. CONCLUSÕES

01 GERAIS:

- a) De modo geral, comparando-se a investigação do morro simétrico A, de inclinação 25° e do morro assimétrico, de inclinação 34° , em três alturas de normalização até a inclinação limite analisada do morro simétrico D, de inclinação 68° , pode-se constatar a máxima que segue: os perfis analíticos analisados são em geral maiores que aqueles construídos por medições experimentais. Esta constatação aumenta com o aumento da inclinação do morro e para o escoamento em 3D. Esta verificação ocorre mais explicitamente com o emprego de alturas maiores de normalização em relação a altura limite do perfil, sendo válido tanto para cume de modelos assimétricos como simétricos;
- b) Os modelos analíticos analisados para o cume dos morros para os dois tipos de vento em 2D e 3D, tanto para os morros simétricos quanto para o assimétrico, não traduzem o fenômeno existente no topo do morro, qual seja a velocidade incremental do vento nestes pontos identificada nas medições experimentais, conforme Figuras 104 e 105 do corpo do texto.
- c) os perfis experimentais, da mesma forma, não traduzem a velocidade incremental do vento conforme Figuras 1 a 8 do Anexo B, relativas aos modelos do Experimento I e 9 a 10 do mesmo anexo, relativas ao modelo do Experimento II.
- d) Uma das maiores considerações atinente a aplicação dos modelos analíticos analisados é que os mesmos não traduzem também os efeitos da esteira do vento que ocorre a sotavento do morro, ainda que considere-se apenas

modelos simétricos, construindo nestes pontos perfis semelhantes aqueles encontrados a barlavento. Destaque à norma Japonesa AIJ que oferece rotina de cálculo diferenciada para estes locais. Entretanto, a metodologia proposta pela norma citada não traduz nos perfis a real extensão que a esteira se evidencia;

- e) A NBR 6123 e o CEN TC:250 mostraram comportamentos similares em todos os pontos para os dois tipos de vento, para morros simétricos e assimétrico.

02 MODELOS HIPOTÉTICOS SIMÉTRICOS A,B,C e D

- a) As normas analíticas mostraram-se na maioria dos pontos integralizadas em bloco oscilando seu comportamento. Pode-se nominar como a norma mais coincidente com as medições experimentais, na maioria dos pontos medidos, para terrenos Cat I e Cat III-IV, em 2D e 3D, foi a Australiana AS/ANZ 1170.2:2002 nas avaliações normalizadas a 275 m. É considerável também constatar que a NBR 6123 e o CEN TC:250 mostraram comportamentos similares e constantes, geralmente a maior que os perfis experimentais para 275 m e 440 m. Por outro lado, examinando-se os perfis em uma altura de normalização menor, a 77 m, a NBR é coincidente com as medições experimentais;
- b) Relativamente aos perfis experimentais, observou-se o que segue: para 25° e 32° não houve alterações significativas entre as medições experimentais em 2D e em 3D para o vento 0,11 e 0,23, sempre o perfil a 3D a menor que o 2D na sequencia que segue 0,11 -3D, 0,23-3D, 0,23-2D e 0,11 2D. Para 52° e 68° houve significativa diferença entre o vento de 0,11 e 0,23- em 2D e 3D;
- c) Para a avaliação sem normalização, os perfis analíticos para o cume dos morros simétricos A-inclinação 25°, B-inclinação 32°,C -inclinação 52° e D-inclinação 68° mostraram sempre valores maiores que os experimentais para p=0,11 e p=0,23, tanto em 2D, quanto em 3D, sendo esse espaçamento maior para p=0,11/3D;

d) Estabelecendo-se um comparativo entre as medições experimentais.

03 ÁREA COMPLEXA E MORRO ASSIMÉTRICO

a) Os pontos em solo internos a área complexa mostraram a conformação do perfil experimental bem diferente daquele evidenciado pelas normas analíticas, o que leva ao entendimento que as mesmas tem uma limitação na consideração dos elementos de entorno em áreas complexas.

04 MODELOS ANALÍTICOS PROPOSTOS

Modelo Americano:

a) Os valores estabilizados para o termo $K_1(d/L_s)$, parâmetro integrante do Fator Topográfico para o cálculo da velocidade característica do vento para o intervalo de inclinações examinado, de 25° a 68° , para as Categorias D e C, 2D e 3D, considerando-se os valores da NBR para z_g , ou seja 250 m para, Categoria D (ASCE considera 213 m) e $z_g = 385$ m para Categoria C (ASCE considera 366 m) foram, para o universo de análise aqui atinente, os valores abaixo testados constantes Tabela 41.

Tabela 41 - Valores dos multiplicadores vigentes e testados para multiplicador “x” do fator topográfico segundo ASCE

Forma do morro	Categoria D		Categorias C	
	Valor original	Valor testado	Valor original	Valor testado
Cumes simétricos bidimensionais	1,55	1,35	1,45	1,25

As Figuras 84, a 91 do Anexo F mostram a comparação entre a proposição do multiplicador topográfico experienciado com base na ASCE contido na Tabela 41, os perfis conforme norma atual ASCE e conforme norma Brasileira NBR.

Modelo Brasileiro:

a) A inclinação do morro comprovou ter muito significado na formulação do modelo analítico. Essa evidência é demonstrada nos valores encontrados para os resultados experimentais. Esses dados sugerem a possibilidade da adoção de um

escalonamento para o valor do multiplicador constante do Fator Topográfico S_1 , de acordo com a inclinação do terreno;

- b) Evidencia-se como possível um escalonamento dos multiplicadores do Fator Topográfico para ângulos menores ou iguais a 52° , mantendo-se a interpolação ora vigente no limite considerado.

A consolidação dos multiplicadores experimentados, de acordo com a inclinação dos referenciais investigados, para os modelos ensaiados constam Tabela 42.

Tabela 42 - Valores dos multiplicadores vigentes e testados para o valor de “x” do Fator Topográfico constante na equação 97.

Inclinação morro/categoria terreno	Categoria I , III-IV	
	valor original	valor testado
25° morro isolado	0,31	0,15
De 26° a 34° morro isolado	0,31	0,18
De 35° a 52° morro isolado	0,31	0,22
Acima 53°-morro isolado	0,31	0,31

Conforme o exposto, evidenciou-se como formulação matemática, mantendo-se a interpolação ora vigente, para inclinações de morros de 25° , considerando-se as investigações experimentais em terrenos com menor e maior rugoridade, correspondentes às Categorias I e III-IV, a equação 97

$$S_1(z)=1,0+(2,5-z/d)* 0,15 \geq 1 \quad \text{equação 97}$$

Da mesma forma, conforme o universo experienciado, a equação 98 atende ao cálculo do fator de rugosidade para Categorias I e III-IV para morros com inclinações de 26 a 34° , mantendo-se a interpolação ora vigente.

$$S_1(z)=1,0+(2,5-z/d)* 0,18 \geq 1 \quad \text{equação 98}$$

A equação 99 atende ao cálculo do fator de rugosidade para Categorias I e III-IV para as inclinações de morros de 35° a 52 °, mantendo-se a interpolação para os limites postos.

$$S_1(z)=1,0+(2,5-z/d)* 0,22 \geq 1 \quad \text{equação 99}$$

Acima de 52° , o valor do multiplicador topográfico ora vigente se mantém.

A aplicação da NBR e o multiplicador experimentado para o fator Topográfico de aproximação do perfil da NBR ao modelo experimental constante na Tabela 34 consta nas Figuras 84 a 91 do Anexo F. O multiplicador experimentado reduz com o aumento da inclinação do modelo, conforme verificado no referido Anexo, o que ratifica a tendência ao emprego de um escalonamento para o multiplicador topográfico.

8.1 SUGESTÃO PARA NOVOS ESTUDOS

1 As conclusões limitam-se a uma amostra com nove modelos, quatro simétricos com 25°, 32°, 52° e 68° bidimensionais, quatro simétricos com as mesmas inclinações tridimensionais e um assimétrico com inclinação de 34°. Sugere-se ampliar o universo estudado verificando a constância dos valores encontrados para os multiplicadores topográficos dos Modelos Analíticos de aproximação ao experimental.

2 Examinar os modelos hipotéticos simétricos A,B,C e D em perfis locados a barlavento e a sotavento dos morros.

9 REFERÊNCIAS

AMERICAN STANDARD. **ASCE/SEI 7-05**: the international building code: ASCE manual of practice: wind tunnel model studies of buildings and structures: ASCE manuals and reports on engineering and practice. ASCE/SEI, 2006.

ANTONIA, R. A.; LUXTON, R. E. The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness Part 1. Smooth to rough, **J. Fluid Mech.**, v.48, n.4, p.721-761, 1971.

ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN. **AIJ**: recommendations for loads on buildings. Japan, 2004.

ARYA, S. P. S. **Introduction to Micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 1988. (International Geophysics Series, v.79).

ARYA, S. P. S.; GADIYARAM, P.S. An Experimental Study of Flow and Dispersion in the Wakes of Three Dimensional low Hills. **Atmos. Environ.**, v.20, p.729-740, 1986.

ARYA, S. P. S.; CAPUANO, M. E.; FAGEN, L. C. "Some Fluid Modeling Studies of Flow and Dispersion Over Two-dimensional Low Hills". **Atmosph. Environment**, v.21, p.753-764, 1987.

ARYA, S. P. S.; SHIPMAN, M. An Experimental Investigation of Flow and Diffusion in the Disturbed Boundary Layer over a Ridge – I. Mean Flow and Turbulence Structure'. **Atmos. Environ.**, v.15, p.1173-1184, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 (NB-599)**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL. 2002. Disponível em: <<http://www.semc.rs.gov.br/atlas/valida.htm>>. Acesso em: 20 mai. 2007.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **AS/NZS 1170.2**: structural design actions: wind actions Australian/New Zealand standards. Australian/New Zealand, 2002. Disponível em: <<http://www.eng-comp.com/windload/windcue.html>>. Acesso em: 21 jul. 2009.

AYOTTE, K. W.; DAVY, ROBERT J.; COPPIN, PETER A. A Simple Temporal and Spatial Analysis of Flow in Complex Terrain in the Context of Wind Energy Modelling. **Boundary-Layer Meteorology**, Australia, v.98, p. 275–295, 2001.

AYOTTE, K. W.; XU, D.; TAYLOR, P. A. 'The Impact of Different Turbulence Closures on Predictions of the Mixed-Spectral Finite-Difference Model for Flow over Topography'. **Boundary-Layer Meteorology**, Australia, v.68, p.1–33, 1994.

AYOTTE, K. W.; TAYLOR, P. A. 'A Mixed Spectral Finite Difference 3D Model of Neutral Planetary Boundary Layer Flow over Topography'. **J. Atmos. Sci.**, v.52, p.3523–3537, 1995.

AYOTTE, K. W.; HUGES, D. E. Observations of Boundary-Layer Wind Tunnel Flow over Isolated Ridges of Varying Steepness and Roughness. **Boundary Layer Meteorology**, Australia, v.3, n.112, p.525-556, 2004.

BELCHER, S. E.; HUNT, J. C. R. "Turbulent Flow Over Hills and Waves". **Annual Reviews Fluid Mech.**, v.30, p.507-538, 1998.

BELJAARS, A. C. M.; WALMSLEY, J. L.; TAYLOR, P. A. 'A Mixed-Spectral Finite-Difference Model for Neutrally Stratified Boundary Layer Flow over Roughness Changes and Topography'. **Boundary-Layer Meteorology**, Austrália, v.38, p.273-303, 1987.

BLESSMANN, Joaquim. **Simulação da Estrutura do Vento Natural em um Túnel de vento Aerodinâmico**. 1973. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Aeronáutica e Espaço - ITA, São José dos Campos, 1973.

BLESSMANN, Joaquim. **Aerodinâmica das Construções**. Porto Alegre: Sagra, 1990.

BLESSMANN, Joaquim. **O Vento na Engenharia Estrutural**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1995.

BLESSMANN, Joaquim. The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v.10, p.231-248, 1982.

BOWEN, A.J. The Prediction of Mean Wind Speeds above Simple 2D Hill Shapes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.15, p.259-270, 1983.

BOWEN, A.J.; LINDLEY, D. "A Wind-Tunnel Investigation of Wind Speed and Turbulence Characteristics Close to the Ground Over Various Escarpment Shapes". **Boundary-Layer Meteorology**, Australia, v.12, p.259-271, 1976.

BRADLEY, E. S. et al. An Experimental Study of the Profiles of Wind Speed, Shearing Stress and Turbulence at the Crest of a Large Hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 447, p.101-123, 1980.

BRITTER, R.E.; HUNT, J.C.R.; RICHARDS, K.J. "Airflow Over a Two-dimensional Hill: studies of velocity speedup, roughness effects and turbulence". **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.107, p.91-110, 1981.

BUCKES, J.; HARATY, T. J.; ADRIAN, R. J. Turbulent Flow Over Large Amplitude Wavy Surfaces. **J. Fluid Mech.**, v.140, p. 27-44, 1984.

BURTON, Tony et al. **Wind Energy Handbook**. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2001. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119992714.fmatter/pdf>>. Acesso em: 12 jun.2012.

BWEA. London: Renewable, 2010. Disponível em:<www.bwea.com/noabl>. Acesso em: 3 nov. 2009.

CALIFORNIA REGIONAL WIND ENERGY FORECASTING SYSTEM DEVELOPMENT. Volume 3: Wind Tunnel Modeling of Wind Flow over Complex Terrain. Califórnia: Electric Power Research Institute, 2006.

CATTIN, René et al. **Wind Modeling in Mountainous Terrain**: validation by SODAR. Bern, Witzerland, 2002. Disponível em: <www.meteotest.ch>. Acesso em: 13 set. 2009.

CERMAK, J. E. **Wind Tunnel for the Study of Turbulence in the Atmospheric Surface Layer**. Final Report Air Force Cambridge Center, Air Research and Development Command Bedford, MA: [s. n.], 1958. 36p.

CERMAK, J. E. Applications of Fluid Mechanics to Wind Engineering — a freeman scholar lecture. **ASME J. Fluids Eng.**, v.97, n.1, p.9-38, mar. 1975.

CERMAK, J. E., Physical modeling of the atmospheric boundary layer in long boundary-layer wind tunnels, *Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*, Cambridge University Press, p 97-125, 1982.

COOK, N. J. On applying a general atmospheric simulation method to a particular urban site for ad-hoc wind loading or wind environment studies. **Atmospheric Environment**, v.8, p.85-87, 1972.

COOK, N. J. , Wind Tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods, *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol. 3, 1978, p.157-176.

COOK, N. J. **The Atmospheric boundary layer**: the Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures. London: Butterworths, 1985.

CORBETT, Jean-François. **RAMSIM**: a fast computer model for mean wind flow over hills. Denmark: Technical University of Denmark, 2007.

CORBET, G.A. The airflow over mountains. A review of the state of current knowledge. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.80, p.491 – 654, 1954.

COUNIHAN, J. An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel. **J. Fluid Mechanics.**, v.3, p.197-214, 1969.

COUNIHAN, J.; HUNT, J.C.R; JACKSON, P.S. Wakes Behind Two-dimensional Surface Obstacles in Turbulent Boundary Layer. **J. Fluid Mech.**, v. 64, p.529–563, 1974.

DANTECDYNAMICS. Laser Optical Measurement System. Disponível em: <www.dantecdynamics.com>. Acesso em: 19 jan. 2009.

DANTECDYNAMICS. Disponível em: <www.dantecdynamics.com>. Acesso em: 7 mai. 2011.

DAVENPORT, A. G.; ISYUMOV, N. **A Wind Tunnel Study of a Proposed 53-story Building for the Seattle-first National Bank**. London: The University of Western Ontario, 1967. (Engineering Science Research Report BLWT-1-67).

DAVENPORT, A.G.; SURRY, D.; LEMELIN, D.R. "Simple approximations for wind speed-up over hills. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 28, p. 117-127, 1988.

DEAVES, D. M.; HARRIS, R. I. A Mathematical Model of the Structure of Strong Winds. In: **CIRIA Report 76**. London: Construction Industry Research and Information Association, 1978.

DERICKSON, R. G. et al. Resolving Difficult Issues of Wind Power Micrositing in Complex Terrain. In: **AWEA GLOBAL WINDPOWER CONFERENCE, 2004, Chicago. Proceedings...** Chicago, 2004.

DURRAN, D.R. Mountain Waves and Downslope Wind. Atmospheric Processes over Complex Terrain. **American Meteorological Society**. Boston: Blumen, 1990. 323p.

ESDU. Characteristics of Atmospheric Turbulence Near the Ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere). 1985. Disponível em: <http://www.esdu.com/cgi-bin/ps.pl?sess=unlicensed_1111019151428vyt&t=sec&p=sec_stru11,2011>. Acesso em: 03 abr. 2012.

EUROPEAN COMMISSION, EUROCODE 1: actions on structures- Part 1-4 General Actions- Wind Actions. European Standard, CEN TC 250, 2002.

FARELL et al. Experiments on the Wind Tunnel Simulation of Atmospheric Boundary Layers. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, U.S.A., v.79, p.11-35, 1999.

FERREIRA, A. D, et al. Experimental and Numerical Simulation of Flow around Two Dimensional Hills. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 54/55, p.173-181, 1995.

FINARDI, Sandro; MORSELLI, Maria Grazia; JEANNET, Pierre. **Wind Flow Models over Complex Terrain for Dispersion Calculations, Report Pre-processing of Meteorological Data for Dispersion Models**. Danmarks: Aarhus Universitet, 1987. Disponível em: <www.dmu.dk>. Acesso em: 04 jan.2010.

FINNIGAN, J. J. Air Flow over Complex Terrain. In: STEFFEN, W.L., DENMEAD, O.T. **Flow and Transport in the Natural Environment**. Berlin: [s.n.], 1988. p. 183–229.

FOUNDA, D. et al. Some Measurements of Turbulence Characteristics Over Complex Terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, Austrália, v.83, p.221-243, 1996.

FROUDE, William. **Experiments Duly on a Scale Will Give Results Truly Indicative of the Performance of Full Size Ships**. [S.l : s.n.], 1868.

FUJIMOTO, M. et al., An Experimental study on wind flow over a sudden change of terrain roughness and various escarpments. Proceedings of 6 th National Symposium on Wind Engineering, Tokio, pp 45-52,1980.

GARRAT, J. R. **The Atmospheric Boundary Layer**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 316 p.

GARTSHORE, I. S.; DE CROOS, K.A. **Roughness Element Geometry Required for Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Wind, Fluids Engineering Division Paper 76-WA/FE-18**. New York: ASME Winter Annual Meeting, 1976.

GRANT, A.L.M.; MASON, P.J., Observations of Boundary Layer Structure Over Complex Terrain. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v.116, p.159-186, 1990.

GONG, W.; IBBETSON, A., A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow Over Model Hills. **Boundary-Layer Meteorol.**, Australia, v.49, p.113-148, 1989.

GRUPO DE ESTUDOS TÉRMICOS E ENERGÉTICOS – GESTE. Porto Alegre: UFRGS, 2009. Disponível em: <www.geste.mecanica.ufrgs>. Acesso em: 13 set. 2009.

HELLE, Lauri. The Use of a Split-fiber Probe for Aerodynamic Research, Technical Research Centre of Finland, Espoo. **Dantec Information**, n.12, p. 17-20, 2003.

HIGNETT, P.; HOPWOOD, W. P. Estimates of Effective Surface Roughness over Complex Terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 68, p. 51-73, 1994.

HIRATA; Miguel; ARAÚJO, Maria Regina O. P. de. **Introdução ao Aproveitamento de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000.

HOLMES, John D. **The atmospheric boundary layer and wind turbulence. In: Wind Loading of Structures**. Spon Press, UK, 2001.

HOLMES, J.; ROFAIL, A.; AURELIUS, L. High Frequency Base Balance Methodologies for Tall Buildings with Torsional and Coupled Resonant Modes In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 11., 2003, Lubbock, Texas. **Proceedings...** Lubbock, Texas, 2003.

HOLMES, J.D.; BAKER, C. J., TAMURA, Y. Tachikawa number: a proposal. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.94, p.41-47, 2005.

HUNT, J.C.R and SIMPSON, J.E Atmospheric boundary layer over nonhomogeneous terrain. In *Engineering Meteorology* (E.J. Plate, ed), p.89, figura 20. 1982

HUNT, J.C.R.; LEIBOVICH, S.; RICHARDS, K.J. Turbulent Shear Flows over Low Hills. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.114, p.1435-1470, 1988.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. Wind Turbine Generator Systems-part 13: measurement of mechanical loads. Switzerland, 1999.

IRWIN, H. P. A. H. The Design of Spires for Wind Simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.7, p.361-366, 1981.

ISHIRARA, T.; HIBI, K.; OIKAWA, S. A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow over a Three-dimensional Steep Hill. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.83, p.95-107, 1999.

ISHIRARA, T., FUJINO, Y.; HIBI, K. A Wind tunnel study of separated flow over a two dimensional ridge and a circular hill, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.89, p.573-576, 2001.

ISHIZAKI, H. Wind Profiles, Turbulence Intensities and Gust Factors for Design in Typhoon-prone Regions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.13, p.55–66, 1983.

JACKSON, P.S.; HUNT, J.C.R. Turbulent Wind Flow Over a Low Hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.101, p.929-955, 1975.

JAPANESE CODE. **AIJ**: Architectural Institute of Japan, 2004. Disponível em: <www.aij.or.jp>. Acesso em: 14 abr. 2009.

JENSEN, M.; FRANK, N. **Model Scale Tests in Turbulent Wind**. Copenhagen: Danish Press, 1963.

JENSEN, M.; FRANK, N. **Model Scale Tests in Turbulence Wind**. Copenhagen: Danish Press, 1965. Part. 2.

JENSEN, N.O. Escarpment induced flow perturbations, a comparison of measurements and theory. **Journal of Wind Engineering and Aerodynamics**, v.15, p.243-251, 1983.

JITSCHIN, Wolfgang. Gas Flow Measurement by the Thin Orifice and the Classical Venturi Tube. Germany, **Surface Engineering, Surface Instrumentation & Vacuum Technology - Vacuum**, v.76, p 89-100, 2004.

JONH, Alok et al. Effect of Architectural Features on Low-Rise Buildings. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 7., 2009, Taipei. **Proceedings...** Taipei, 2009.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN J.J. **Atmospheric Boundary Layer Flows-Their Structure and Measurement**. 1994. 298p.

KÁRMÁN, Theodore von. **Aerodynamik**. Geneva: Interavia, 1956.

KIJEWSKI, T.; KAREEM, A. Dynamic Wind Effects: a comparative study of provisions in codes and standards with wind tunnel data. **Wind and Structures**, v.1, n.1, p.77-109, 1998. Disponível em: <[www.nd.edu/~nathaz/journals/\(1998\)Dynamic_Wind_Effects.pdf](http://www.nd.edu/~nathaz/journals/(1998)Dynamic_Wind_Effects.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2010.

KIM, H. G.; PATEL, V.C. Test of Turbulence Models for Wind Flow over Terrain with Separation and Recirculation. **Boundary-Layer Meteorology**, Australia, v.94, p.5-21, 2000.

KIM, H.G. et al. An Experimental and Numerical Study on the Flow over Two Dimensional Hills. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, v.66, 1997.

KJELLER, Vindteknikk A. S. **Microscale Flow Modelling Possibilities and Limitations**. Norway, 2006.

KOZMAR, Hrvoje. Wind – Tunnel Simulations of the Suburban ABL and Comparison with International Standards. **Wind and Structures**, v. 14, n. 1, p. 15-34, 2011.

LECLERCQ, D., Jacob, M., LOISOT, A., TALOTTE, C. Forward-Backward Facing Step Pair: aerodynamic flow wall pressure and acoustic characterization. In: AIAA/CEAS

AEROACOUSTICS CONFERENCE, 7., 2001, Netherlands. **Proceedings...** Netherlands, 2001.

LETTAU, H. **Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element distribution.** [S.l.]: J. Appl, 1969.

LI, Y. Q et al. "Comparison on Topographical Speed-up Effects on Wind Flow Provided by Main Load Codes/Specifications for Design of Building Structures. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 6., 2005, Korea. **Proceedings...** Korea: APCWE –VI, 2005. p.318-328.

LI, Q.S. et al. Wind Tunnel and Full-scale Study of Wind Effects on China's Tallest Building. **Engineering Structures**, Amsterdam, v. 28, p. 1745-1758. 2006.

LIGRANI, P.M.; MOFFAT, R. J.; KAYS, W.M. **The Thermal and Hydronomic Behavior of Thick Rough-wall Turbulent Boundary Layers Report HMT-29** Stanford University, 1979.

LIGRANI, P.M.; MOFFAT, R. J.; KAYS, W.M. Artificially Thickened Turbulent Boundary Layer for Studying Heat Transfer and Skin-friction on Rough Surfaces. **J. Fluid Engineering**, v.105, p.146-153, 1983.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. "Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de vento". In: MÖLER, S. M; SILVESTRINI J. (Org.). **Anais da IV Escola de Primavera Transição e Turbulência.** Porto Alegre: [s.n.], 2004. p.137-163. v.4.

MAHARANI, YOHANA NORADIKA, SUNGU LEE and YONG KYU LEE . "Topographical effects on Wind Speed over various Terrains: a case study for Korean Peninsula." Chungbuk National University, Republic of Korea. The Seventh Asia –Pacific Conference on Wind Engineering, 2009, Taipei, Taiwan.

MARUYAMA, T.; ISHIZAKI, H. A Wind Tunnel Test on the Boundary Layer Characteristics above Urban Area. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, v. 28, p.139-148, 1988.

MASON, P.J. Flow over the summit of isolated hills. **Boundary Layer Meteorol.**, Australia, v.37, p.385-405, 1986.

MASON, P. J.; KING, J. C. Atmospheric Flow Over a Succession of Nearly Two-Dimensional Ridges and Valleys. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.110, p.821-845, 1984.

MASON, P. J.; KING, J. C. Measurements and Predictions of Flow and Turbulence Over an Isolated Hill OF Moderate Slope. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.111, p.617-640, 1985.

MASON, P. J.; SYKES, R. I. Flow Over an Isolated Hill of Moderate Slope. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.105, p.383-395, 1979.

MELBOURNE, W. H. Wind Characteristics: flow over hills and ridges-discussion. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.15, p.299-301, 1983.

MERONEY R. N. Fluid Dynamics of Flow over Hills and Mountains: insights obtained through physical modeling. Chapter 7 in **Atmospheric Processes Over Complex Terrain**, ed. William Blumen American Meteorological Society v.23, n.45, p.145-172, jun.1990.

MILLAN, M. M. et al. **Mesometeorological Cycles of Air Pollution in the Iberian Peninsula**. Air Pollution Research. Bruselas: European Commission DG XII/E1 - EUR N'14834, 1992. (Report, n. 44).

MILLER, Craig Alexander; DAVENPORT, A. G. "Guidelines for the Calculation of Wind Speed-ups in Complex Terrain". **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.74-76, p.189-197, 1998.

MILLER, Craig Alexander. **Turbulent Boundary Layers Above Complex Terrain**. London: University of Western Ontario, 1995.

MILLER, I. S.; SHAH, D. A.; ANTONIA, R. A. A Constant Temperature Hot-wire Anemometer. **Journal of Physics E.: Scientific Instruments**, v.20, p.311-314, 1987.

MITSUTA, Y.; TSUKAMOTO, O.; NENOI, M. Wind Characteristics over Complex Terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.15, p. 185-196, 1983.

MOLLY, Jens Peter. "**Centrais Eólicas: técnicas, planejamento, financiamento e verificação**". Fortaleza: Deutches Windenergie Institut, 2006. (Curso de Energia Eólica).

MOREIRA, Gilberto Augusto Amado et al. Estudo da Camada Limite Atmosférica sobre Terrenos Complexos. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. **Anais...Cusco**, 2007.

NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA, 2005. Disponível em: <<http://www.nationalcodes.nrc.gc.ca/eng/nbc/index.shtml>>. Acesso em: 25 set. 2012

NEFF, David E.; MERONEY, N. Robert. Wind Tunnel Modeling of hill Mand Vegetation Influence on Wind Power Availability. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, U.S.A., v.74-76, p.335-343, 1998.

NGO, Tang; LETCHFORD, Cris. A Comparison of Topographic Effects on Gust Wind Speed **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, U.S.A., v.96, p.2273-2293, 2008.

NIEMANN, Hans-Juergen. The European Wind Loading Code: background and regulation. In: STRUCTURES CONGRESS BY AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE, 61., 2004, Germany. **Proceedings...** Germany: Department of Civil Engineering, Ruhr-Universitaet Bochum, 2004. (D-44780, ASCE 137).

NÚÑEZ, Gustavo Javier Zani. **Determinação Experimental e Teórica da Resposta Transversal à Ação do Vento de uma Torre de Telecomunicações de Concreto Armado**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen & Co, 1987. 435p.

OLIVEIRA, Mario Gustavo Klaus. **Desenvolvimento de uma Balança Dinâmica de Três Graus de Liberdade para Estudo dos Efeitos de Flexo Torção em Edifícios Altos Submetidos à Ação do Vento**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PALMA et al. Linear and Nonlinear Models in Wind Resource Assessment and Wind Turbine Micro-siting in Complex Terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.96, p.2308-2326, 2008.

PEARCY, R. W. et al. **Plant physiological Ecology; Field Methods and Instrumentation**. New York: Chapman and Hall, 1989. 442p.

PETRY, A. Prisco. **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

PLATE, E. J.; LIN, C. W. **The Velocity Field Downstream from a Two-dimensional Mode Hill**. Colorado: Colorado State University, 1965. Part. I.

PLATT, R. B.; GRIFFITHS, J. F. **Environmental Measurement and Interpretation**. New York: Robert E. Krieger, 1972. 231p.

PRANDTL, L. **Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung, Verhandl. Heidelberg, Detchland: Des Intern. Math.-Kongr.,1904.**

RASOULI, Ashkana; HANGAN, Horia; KAMRAN, Siddiqui. PIV Measurements for a Complex Terrain The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 12., 2007, Australian. **Proceedings...** Australian: ICWE, 2007.

REINHOLD, T. A. Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIND TUNNEL MODELING CRITERIA AND TECHNIQUES IN CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS, 1982, London. **Proceedings...** London: Cambridge University Press, 1982.

ROBINS, A. G. The Development and Structure of Simulated Neutrally Stable Atmospheric Boundary Layers. **Journal of Industrial Aerodynamics**, v.4, p.71-100, 1979.

RØKENES, KJERST **Investigation of terrain effects with respect to wind farm siting** Doctoral theses at NTNU:199 Høgskoleringen, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Noruega,2009.

ROTACH, Mathias W. et al. Boundary Layer Characteristics and Turbulent Exchange Mechanisms in Highly Complex Terrain. **Acta Geophysica**, v. 56, n.1, p. 194-219, 2008.

RUSCHEWEYH, Hans. Experience with the new European Wind Load Code. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.65, p.243-260, 1996.

SABATINO, S. et al. The Vertical Structure of the Stable Boundary Layer over Small Topographic Features. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.74-76, p. 199-208, 1998.

SALMON, J. R. et al. 'The Kettles Hill Project:Field Observations. Wind-Tunnel Simulations and Numerical Model Predictions for Flow over a Low Hill', **Boundary-Layer Meteorol.** Australia, v.43, p.309–343. 1988.

SCHLICHTING, Hermann. **Boundary Layer Theory**. USA: McGRAW-Hill, 1968. (Mechanical Engineering).

SCRUTON, C. **The Use of Wind Tunnels in Industrial Aerodynamic Research**. England: Department of Scientific and Industrial Research, National Physical Laboratory, 1960. (Report NPL/Aero/411).

SHERRY, M; JACONO, D. Lo; SHERIDAN, J “An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a forward facing step. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.98, p.888-894, 2010.

SIMIU, E.; SCANLAN, R.H. **Wind Effects on Structures**. 3rd. New York: [s.n.], 1996. 688p.

SONG; DE GRAFF, D. B.; EATON, J. K. “A High–resolution Laser Doppler Anemometer: Design, Qualification and Uncertainty”. **Exp. in Fluids**, v.30, p.522–530, 2000.

SPREITZHOFER, Gerald; RADERSCHALL, Norbert. **Deriving a Vertical Sounding of the Atmosphere over Alpine Terrain Based on the Almo Model Output**. Switzerland: Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, 2003.

SURRY, D.; STATHOPOULOS, T. **The Wind Loading of Low Building with Mono-sloped Roofs**. Canadá: The University of Western, 1988. (Final Report BLWT-SS38). SUZLON. Disponível em: <<http://www.suzlon.com>>. Acesso em: 09 jun. 2010.

STATHOPOULOS, Ted; ZISIS, Ioannis; WANG, Kai. **Terrain Classification and Exposure Factor in the 2005 National Building Code of Canada**. Canada: Concordia University, 1990.

STECKLEY et al. The Synchronous Pressure Acquisition Network (SPAN). In: ASCE STRUCTURES CONGRESS, 9., 1991, Indianapolis, Indiana. **Proceedings...** Indianapolis, Indiana, 1991. p. 556-559.

STEYN, D. H. et al. Air Pollution in Coastal Cities. In: NATO/ITM ON AIR POLLUTION MODELLING AND ITS APPLICATION, 21., 1995, Baltimore, USA. **Proceedings...**Baltimore, USA, 1995.

STRATARIDAKIS, Constantine; WHITE, Bruce R.; GREIS, Andreas. **Turbulence Measurements for Wind-Turbine Siting on a Complex Terrain**. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998.

STULL, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**, Kluwer, The Netherlands: Academic Publishers, Dordrech, 1988. Disponível em: <www.wkap.nl>. Acesso em: 2 jan. 2010.

TAKAHASHI, T. et al. Turbulence Characteristics of Wind over a Hill with a Rough Surface. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 90, p.1697-1706, 2002.

TAPP, M. C.; WHITE, P.W. A Nonhydrostatic Mesoscale Model. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.102, p.277-296, 1976.

TAYLOR, P. A.; TEUNISSEN, H. W. The Askervein Hill Project: overview and background data. **Boundary Layer Meteorol.**, Australia, v.39, p.15-39, 1983.

TAYLOR, P.A.; MASON, P.J.; BRADLEY, E. F. Boundary-layer Flow over low Hills, A Review. **Boundary-Layer Meteorol.**, Australia, v.39, p.107-132, 1987.

TAYLOR, P. A.; SYKES, R. I.; MASON, P. J. On the Parameterization of Drag over small scale topography in Neutrally Stratified Boundary Layer Flow. **Boundary Layer-Meteorol.**, Australia, v.48, p.409-422, 1989.

TEUNISSEN, H.W. Wind Tunnel and Full-Scale Comparisons of Mean Wind Flow over an Isolated Low Hill. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Canadá, v.15, p.271-286, 1983.

TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas**. Denmark Risø National Laboratory, 1989. 656 p.

WANG, K.; STATHOPOULOS, Ted. Exposure Model for Wind Loading of Buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.95, n. 9-11, p. 1511-1525, 2007.

WHITBREAD, R. E. The Measurement of Non-steady Wind Forces on Small-scale Building Models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4., 1975, Heathrow, England. **Proceedings ...** Heathrow, England, 1975. p. 567-574.

WITTEWER, Adrián Roberto. **Simulação do Vento Atmosférico e dos Processos de Dispersão de Poluentes em Túnel de vento**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

WHITEMAN, C. D.; DORAN, J. C. The Relationship overlying Synoptic-scale Flows and Winds within a Valley. **J. Appl. Meteorol.**, v.32, p.1669-1683, 1993.

WOOD, N. Wind Flow over Complex Terrain: a historical perspective and the prospect for large-eddy modelling. **Boundary-Layer Meteorol.**, Australia, v.96, p.11-32, 2000.

WOOD, N.; MASON, P. J. 'The Pressure Force Induced by Neutral, Turbulent Flow over Hills'. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.119, p.1233-1267, 1993.

WRASSE, Cristiano Max et al. Ondas de Gravidade na Estratosfera Terrestre inferida através da Técnica de Rádio Ocultação de GPS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.25, p.59-68, 2006.

XIE, Z. N.; GU, M. Mean Interference Effects Among Tall Buildings. **Engineering Structures**, v. 26, p. 1175-1183. 2004.

XU, D.; TAYLOR, P. A. 'A Non-Linear Extension of the Mixed-Spectral Finite-Difference Model for Neutrally Stratified Turbulent Flow over Topography'. **Boundary-Layer Meteorol.**, Australia, v.59, p.177-186, 1992.

XU, D.; TAYLOR P.A. Boundary-Layer Parametrization of Drago ver Small-scaled Topography. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.121, p.433-443, 1995.

XU, D.; AYOTTE, K.W.; TAYLOR, P. A. 'Development of a Non-Linear Mixed Spectral Finite-Difference Model for Turbulent Boundary-Layer Flow over Topography'. **Boundary-Layer Meteorol.**, Australia, v.70, n.4, p.341-367, 1994.

ANEXOS

ANEXO A – Parâmetros, p , z_o , c_{as}

Descrição do Terreno	Parâmetros			
	p	z_o (mm)	$c_{as} \cdot 10^3$	z_o (m)
Mar aberto	0,10-0,11 0,10	0,25 - 2,5 0,3	0,5 - 2,2 0,5	
Campo aberto plano	0,14-0,19 0,16	15 - 60 30	4 - 7 5	275
Floresta	0,25-0,34 0,28	200 - 900 300	11 - 27 15	400
Área urbana	0,36-0,40 0,40	1200 - 5500 3000	30 - 50 50	520
Região costeira ^a		5 - 10		
Região aberta		30 - 100		
Subúrbios		200 - 300		
Centro de cidades pequenas		350 - 450		
Centro de cidades grandes		600 - 800		
a: aplicáveis a estruturas diretamente expostas a ventos soprando de águas livres				
Mar aberto			0,5	
Terreno com grama alta			5	
Zona coberta de mato (Floresta de Munich)		1000	15-30	
Cidade grande		3000	50	
Água livre	0,10	5		
Terreno aberto	0,14	70		
Subúrbios a consideráveis distâncias do centro, em cidades pequenas (zonas com poucas construções, com árvores, cercas vivas, etc)	0,20	300		
Cidades pequenas, subúrbios densamente concentrados, terrenos com mato	0,25	1000		
Centro de cidades grandes	0,35	2500		
Grandes extensões de água, pântanos, campos abertos de neve e grandes superfícies asfaltadas	0,12	3		
Terreno gramado plano, parques ou solo nu, sem cercas vivas e com muito poucas obstruções isoladas;	0,14	10		
Terreno aproximadamente plano ou levemente ondulado, campos com plantações, cercas ou cercas vivas baixas e poucas árvores;	0,16	30		
Terreno com diversas cercas vivas altas, algumas edificações rurais, casas e árvores;	0,20	100		
Matos densos, zonas com residências tipicamente entre 10% e 20% de área construída (densidade);	0,24	300		
Centros de cidades, tendo a maior parte dos edifícios com 4 ou mais andares, tipicamente entre 30% e 50% de área construída (densidade);	0,27	800		
NOTA: expoente p válido para uma altura $z-d$ entre 0 e 300m				
Regiões planas geladas ou com lama		0,01		
Terrenos planos ou ondulados cobertos de neve		0,1		
Mar aberto calmo		0,1		
Vento marítimo na região costeira		1		
Deserto (plano)		0,5		
Superfície natural de neve (fazenda)		2		
Campos gramados aproximadamente planos:				
Grama cortada (~3cm)		8		
Poucas árvores, inverno		10		

Descrição do Terreno	Parâmetros			
	P	z_o (mm)	$c_{as} \cdot 10^3$	z_o (m)
Terreno típico de fazendas:				
Gramma não cortada	20			
Aerportos (zona das pistas)	20			
Gramma alta (~ 60 cm), plantações	40			
Árvores isoladas	30			
Poucas árvores (verão)	50			
Muitas cercas vivas	80			
Muitas árvores, cercas vivas, poucas edificações	150 - 300			
Subúrbios de cidades pequenas*	350			
Regiões arborizadas aproximadamente planas	350			
Centros de cidades pequenas*	500			
Centros de cidades médias e grandes*	600 - 1200			
Florestas	900			
Centros de cidades com edifícios muito altos*	1200 - 3000			
Zona montanhosa ou com muitos morros*	2000			
* Terreno heterogêneo				
Terreno aberto com muito poucos obstáculos	0,16		5	300
Terreno uniformemente coberto com obstáculos de 10 a 15cm de altura	0,28		15	430
Terreno com obstáculos grandes e irregulares	0,40		50	560
Mar tempestuoso	0,12	5 - 10	1	250
Campo aberto (??? aberto)	0,16	10 - 100	5	300
Florestas e áreas suburbanas	0,23	300 - 1000	15	400
Centros de grandes cidades	0,40	1000 - 5000	50	500
Zona plana (pradarias, terra arável)	0,16		5	360
Florestas e matos, subúrbios	0,28		15	450
Cidades com edifícios altos	0,40		50	520
Areia		0,1 - 1	1,2 - 1,9	
Superfície do mar		0,003 ^b - 4 ^b	0,7 - 2,6	
Superfície de neve		1 - 6	1,9 - 2,9	
Gramma cortada (~ 0,01m)		1 - 10	1,9 - 3,4	
Gramma baixa, estepe		10 - 40	3,4 - 5,2	
Terra lavrada		20 - 30	4,1 - 4,7	
Gramma alta		40 - 100	5,2 - 7,6	
Palmeirais		100 - 300	7,6 - 13,0	
Florestas de coníferas (árvores com altura média = 15m; 1 árvore por 10m ² ; $z_d \cong 12m$)		900 - 1000	28,0 - 30,0	
Cidades grandes		750 - 1500	20,0 - 45,0	
a: velocidade do vento para z=10: 1,5m/s				
b: velocidade do vento para z=10: > 1,5m/s				
Mar tempestuoso (Mar aberto)	0,11	1 - 10		250
3				
Pradarias, fazendas	0,16	10 - 100		300
30				
Florestas, subúrbios	0,28	100 - 1000		400
300				
Centros de cidades grandes	0,40	1000 - 3000		500
3000				
Deserto		0,5		
Mar		5		
Carpo		50		
Floresta		500		
Cidades pequenas e grandes		500 - 2000		
(?)				

Descrição do Terreno	Parâmetros			
	P	z_o (mm)	$c_{as} \cdot 10^3$	z_o (m)
Águas livres, tempestuosas			1 - 2	
Campo aberto			3 - 5	
Matos, florestas, áreas suburbanas			15 - 30	
Centros urbanos			30 - 50 (?)	
Campo aberto sem obstruções (ex: pradaria, tundra ártica, deserto)	0,15		5	
Terreno com obstruções baixas, tais como árvores e casas (menos de 10 m de altura)	0,27		15-20	
Zonas urbanas densamente construídas com edifícios altos	0,31 0,43		50	
Campo aberto		10 - 100		274
Florestas e zonas suburbanas		300 - 1000		396
Centros de cidades grandes		1000 - 5000		518
Grandes extensões de campo aberto em nível sem obstruções, superfícies de água, gramados planos, pântanos	0,15		5	280
Campo plano ou ondulados com algumas obstruções, tais como cercas vivas ou muros cercando campos, árvores esparsas e/ou edificações	0,22		8,8	360
Superfícies cobertas por numerosas obstruções grandes. Parques e florestas com muitas árvores, áreas urbanas e suburbanas com nível médio do topo dos telhados ou obstruções a aproximadamente 10 m	0,28		15	400
Superfícies muito irregulares, áreas cobertas por numerosas e grandes obstruções com nível médio do topo dos telhados ou obstruções acima de 25m. Centros de cidades grandes	0,40		40	480
Terreno aberto, extremamente liso		10		
Terra agrícola com fileiras de cercas vivas e edificações		100		
Zonas com casas de 1 andar com jardins		1000		
Zonas com edifícios de 5-6 pisos densamente construídas		10000		
Região costeira		5 - 10	z_d : altura média do plano zero	
Região aberta $z_d = 0$		30 - 100		
Subúrbios		200 - 300	h: altura média dos obstáculos	
Centros de cidades pequenas		400		
Centros de cidades grandes $\cong z_d = 20m$ ou $0,75h$		600 - 800		
Região costeira		5 - 10		
Região aberta		30 - 100		
Subúrbios		200 - 300		
Centros de cidades pequenas		350 - 450		
Centros de cidades grandes		600 - 800		
Mar (calmo - ventoso)		0,003 - 5	350 - 450	
Zona gramada (cortada - alta)		1 - 10		
Floresta de coníferas (15 m altura)		900 - 1000		
Subúrbios		200 - 400		
Centros de cidades pequenas				
Centros de cidades grandes		600 - 800		

Descrição do Terreno	Parâmetros			
	P	z_o (mm)	$c_{as} \cdot 10^3$	z_o (m)
Água livre com extensão de 5km ou mais Zonas planas com lama ou neve; ausência de vegetação e obstáculos Terreno plano aberto; grama, poucos obstáculos isolados		0,2 5 30	x: distância típica entre obstáculos na direção do vento h: altura dos maiores obstáculos	
Plantações baixas; ocasionais obstáculos grandes, $x/h > 20$		100		
Plantações altas; obstáculos esparsos, $15 < x/h < 20$		250 500		
Parques, arbustos; numeroso obstáculos, $x/h < 10$		1000		
Obstáculos grandes regularmente distribuídos (subúrbio, florestas) Centros de cidades grandes com edifícios altos e baixos		?		
Grandes de extensões de água; regiões costeiras planas com ventos marítimos; desertos	0,12	1		
Campo plano ou pouco ondulado com alguns obstáculos (árvores isoladas ou cercas vivas)	0,15	10		
Terreno com certo um certo número de obstáculos (habitações, edificações rurais, cercas vivas)	0,19	100		
Subúrbios de cidades	0,26	500		
Centros de cidades grandes, concentrações de edificações muito altas	0,35	1500		
Terreno aberto	0,16		5	280
Cidades, matos	0,28		15	390
Centros de cidades	0,40		50	510
Categorias da NBR-6123/1988				
I	0,10	5	2,8	250
II	0,16	70	6,5	300
III	0,20	300	13	350
IV	0,25	1000	30	420
V	0,35	2500	83	500
Idem, com alterações em z_o				
I	0,10	5	2,8	250
II	0,16	70	6,5	300
III	0,20	300	13	350
IV	0,25	1000	30	420
V	0,35	2500	83	500

Descrição do Terreno	Parâmetros		
	P	z_o (mm)	$c_{as} \cdot 10^3$ z_o (m)
Areia		0,1 - 1	1,2 - 1,9
Superfície do mar			0,7 - 2,6
Superfície com neve		0,003 ^a - 5 ^b	1,9 - 2,9
Gramma cortada (~ 0,01m)		1 - 6	1,9 - 3,4
Gramma baixa, estepe		1 - 10	3,4 - 5,2
Terra lavrada		10 - 40	4,1 - 4,7
Gramma alta		20 - 30	5,2 - 7,6
Palmeirais		40 - 100	7,6 - 13,0
Florestas de coníferas (árvores com altura média = 15m; 1 por 10m ² ; $z_d \cong 12m$)		100 - 300 900 - 1000	28,0 - 30,0
Subúrbios		200 - 400	10,5 - 15,4
Centros de cidades pequenas		350 - 400	14,2 - 16,6
Centros de cidades grandes		600 - 800	20,2 - 25,1

a: velocidade do vento para z=10m: 1,5m/s
b: velocidade do vento para z=10m: > 1,5m/s

Fonte: (BLESSMANN, 1995)

ANEXO B - Estudo comparativo entre os Perfis do ventos 0,11 e 0,23 e as medições em Túnel de vento dos cumes do Experimentos I e dos pontos identificados no modelo do Experimento II-Área complexa real contendo morro isolado assimétrico e três pontos em solo

Experimento I Modelos Hipotéticos A, B, C e D - Morros isolados simétricos bi e tridimensionais.

Morro simétrico A-inclinação 25°

Figura 1 cume - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

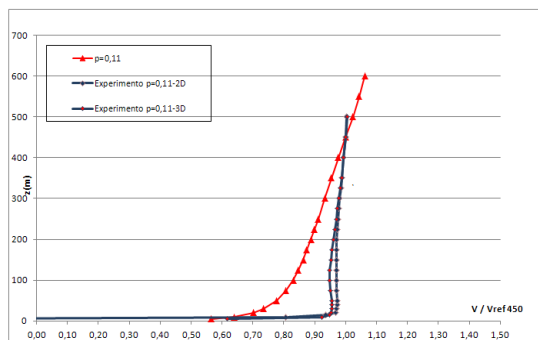
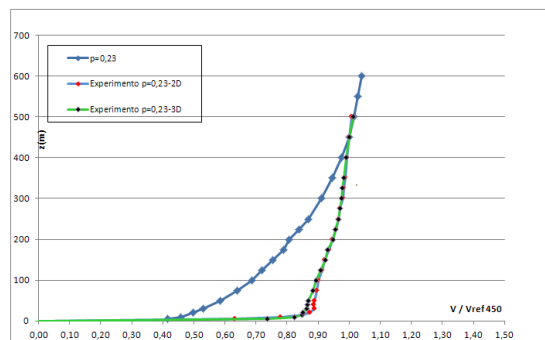


Figura 2 cume - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$



Morro simétrico B-inclinação 32°

Figura 3 cume - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

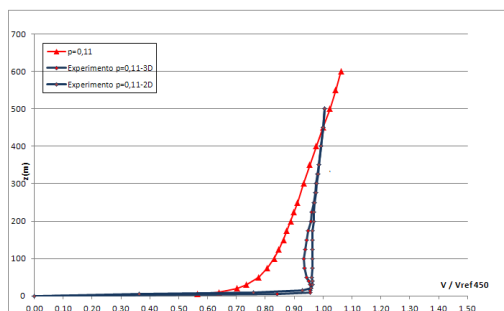
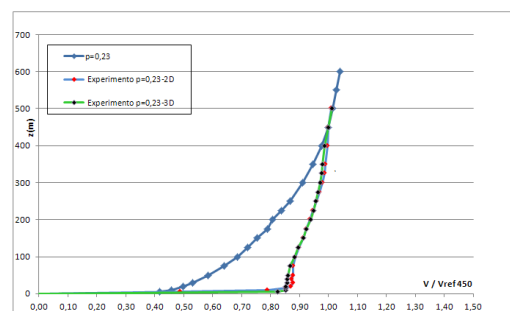


Figura 4 cume - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$



Morro simétrico C-inclinação 52°

Figura 5 cume –Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

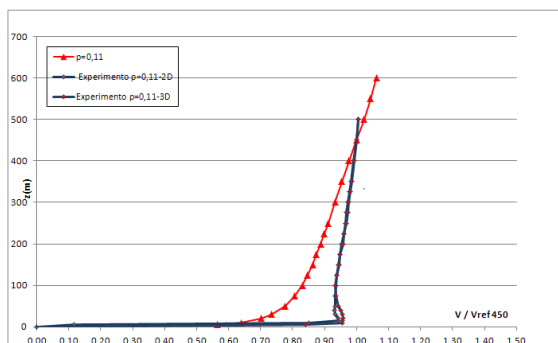
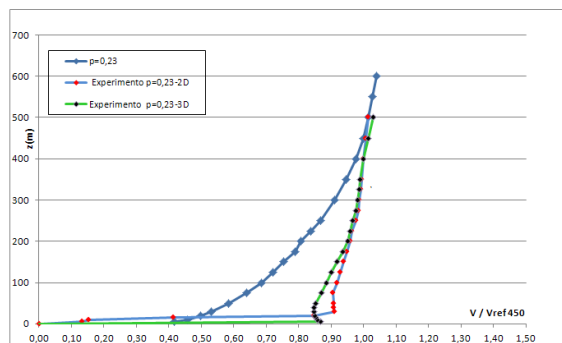


Figura 6 cume- Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$



Morro simétrico D-inclinação 68°

Figura 7 cume –Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

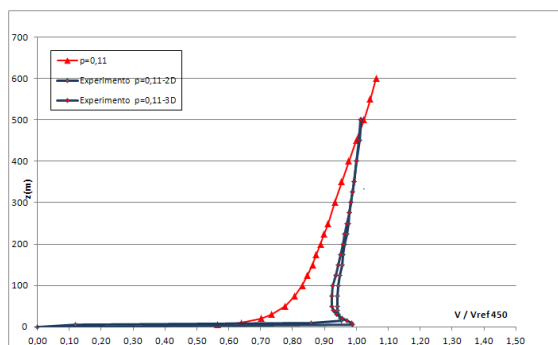
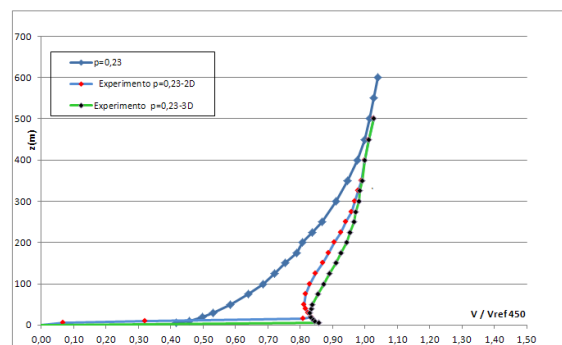


Figura 8 cume- Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$



Experimento II: Área complexa real contendo morro isolado assimétrico e três pontos em solo.

Morro isolado assimétrico-inclinação 34°

Figura 9 Pt 01 –Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

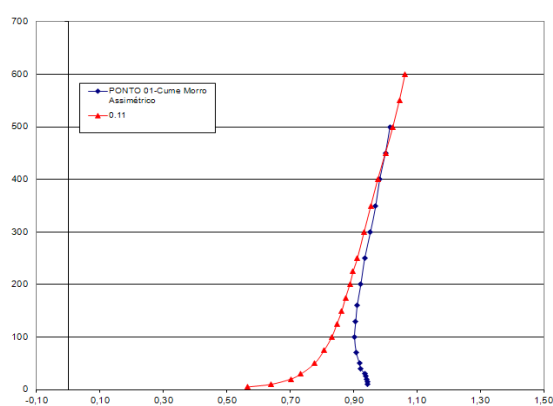


Figura 10 Pt 01- Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

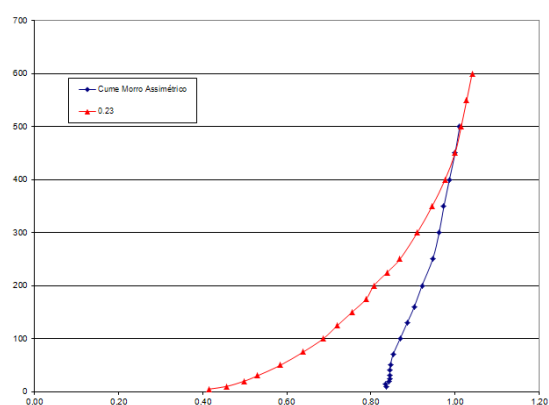


Figura 11 Pt 02 –Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

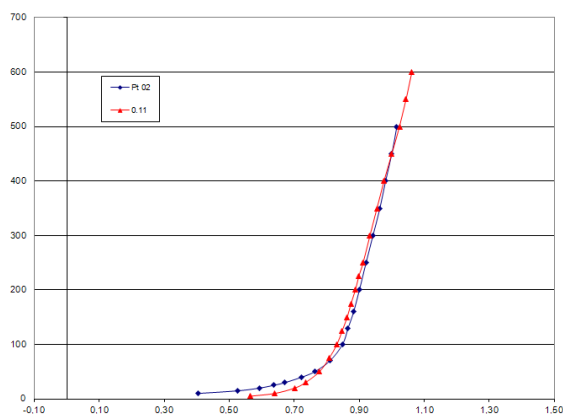


Figura 12 Pt 02 - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

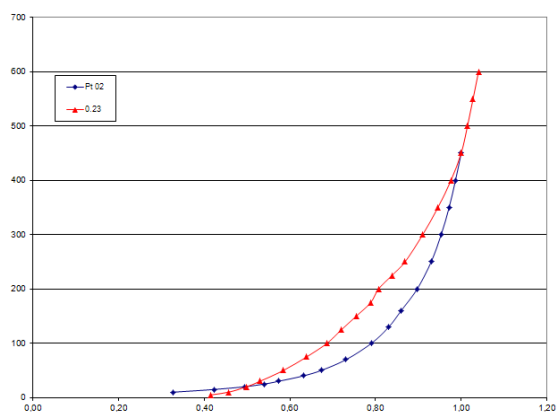


Figura 13 Pt 03–Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

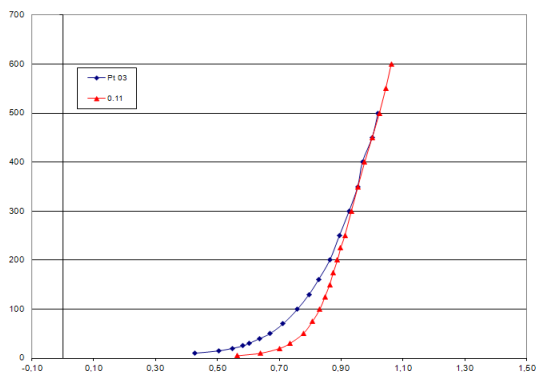


Figura 14 Pt 03 - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

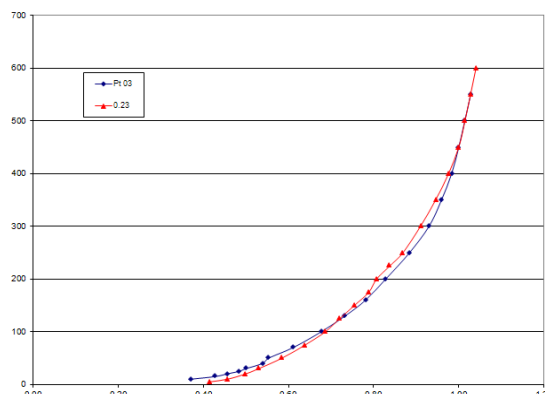


Figura 15 Pt 04-Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

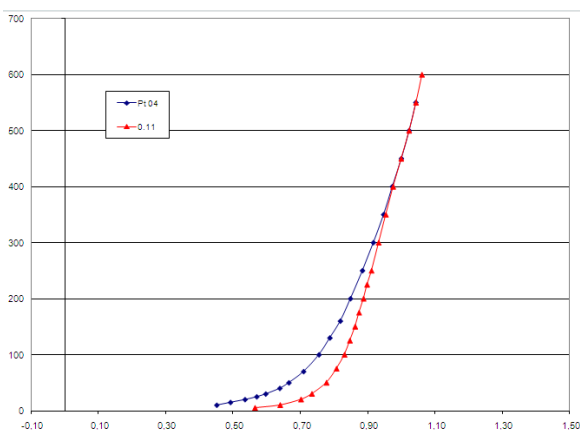


Figura 16 Pt 04-Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

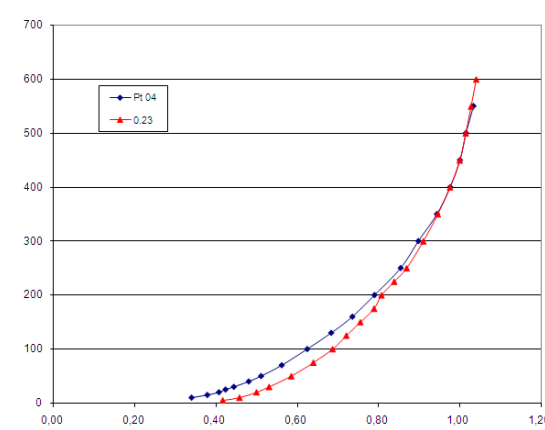


Figura 17 Pt 05 –Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

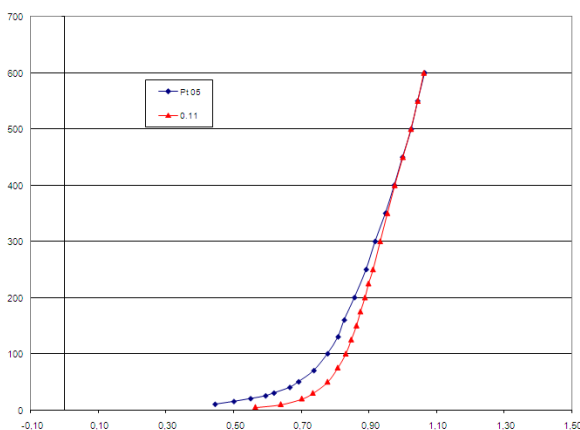


Figura 18 Pt 05- Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

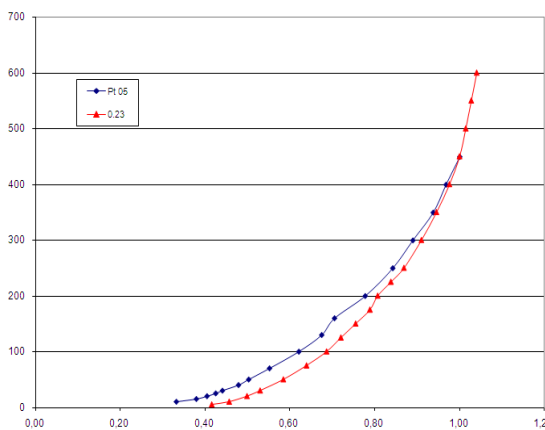


Figura 19 Pt 06–Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

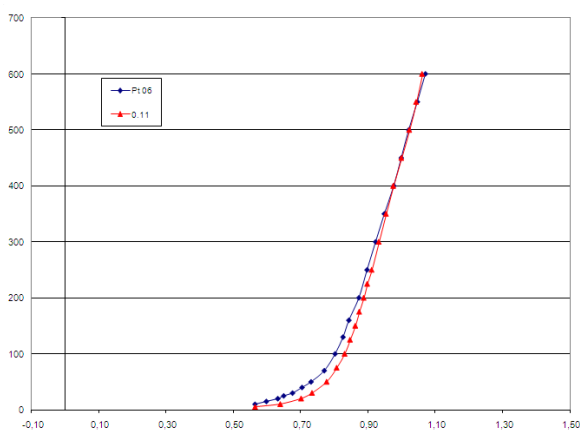


Figura 20 Pt 06 - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

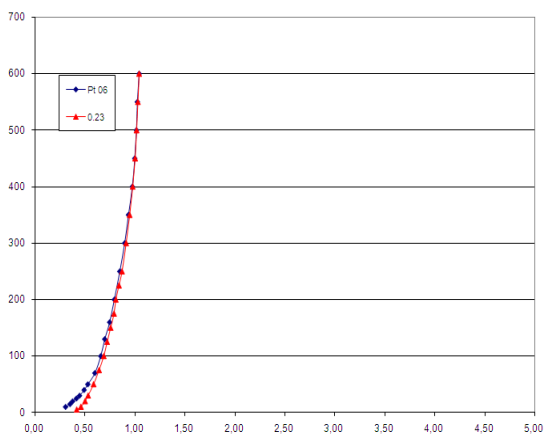


Figura 21 Pt 07-Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

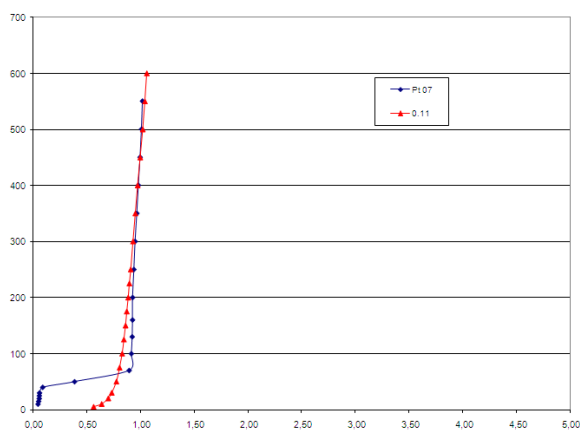


Figura 22 Pt 07-Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

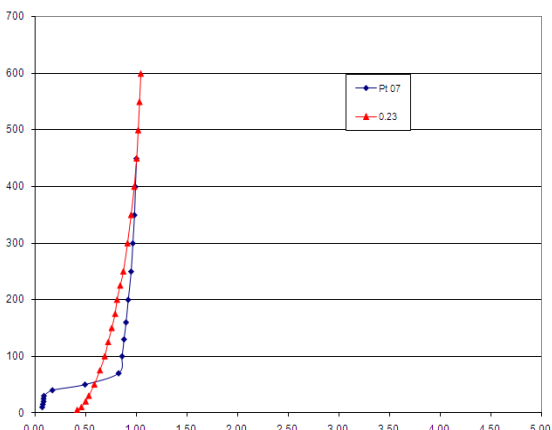


Figura 23 Pt 08 –Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

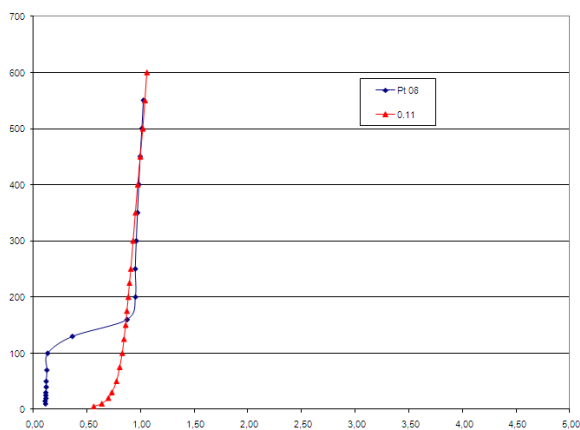


Figura 24 Pt 08- Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

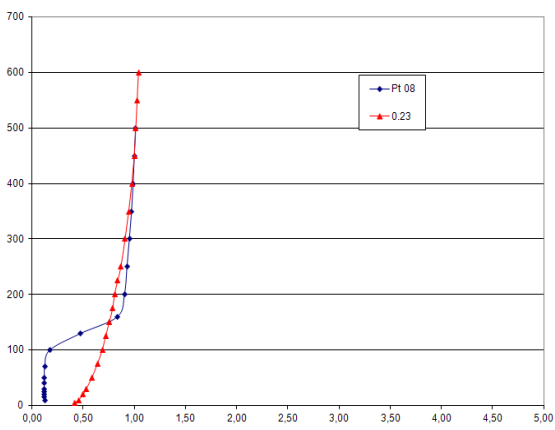


Figura 25 Pt 09–Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

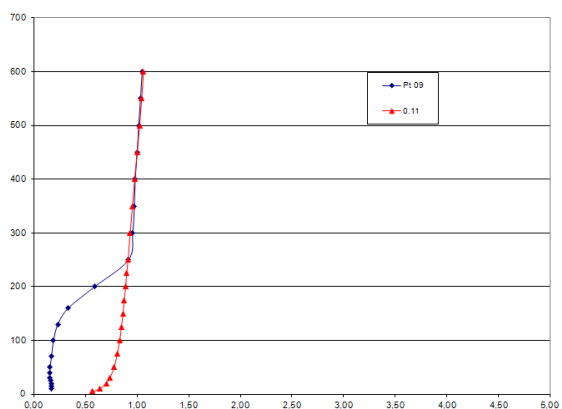


Figura 26 Pt 09 - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

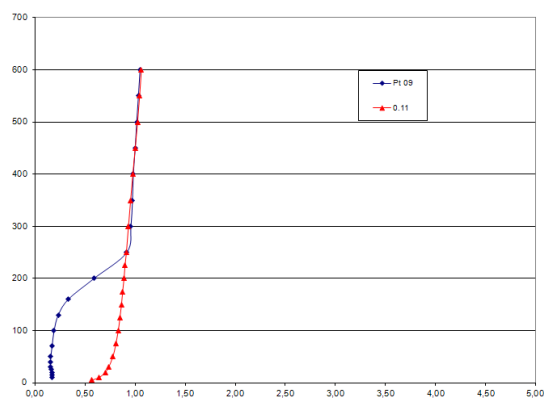


Figura 27 Pt 10–Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

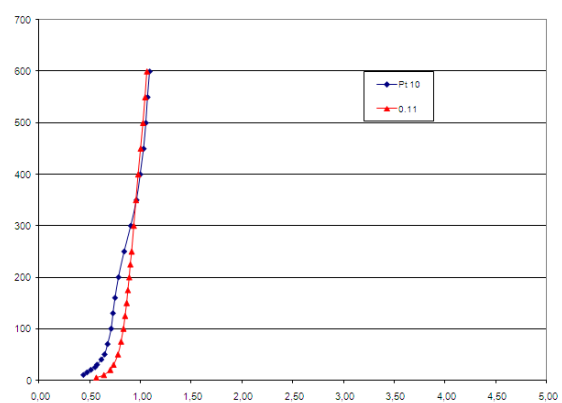


Figura 28 Pt 10–Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

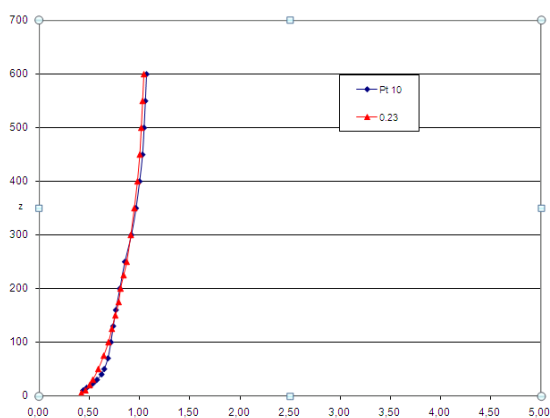


Figura 29 Pt 11 –Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

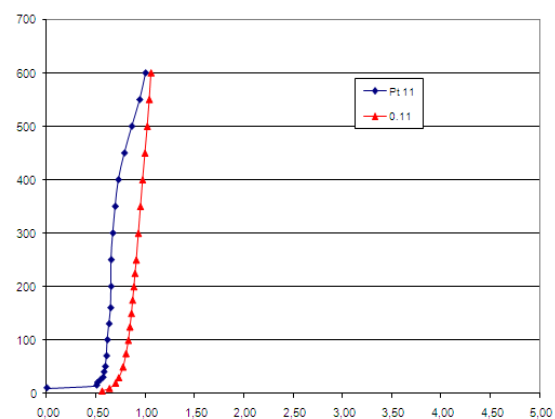


Figura 30 Pt 11- Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$

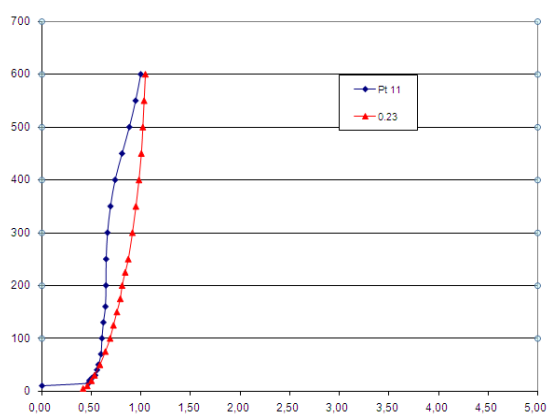


Figura 31 Pt 12–Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,11$

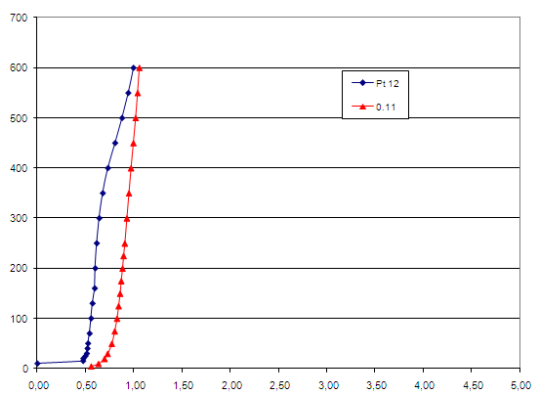
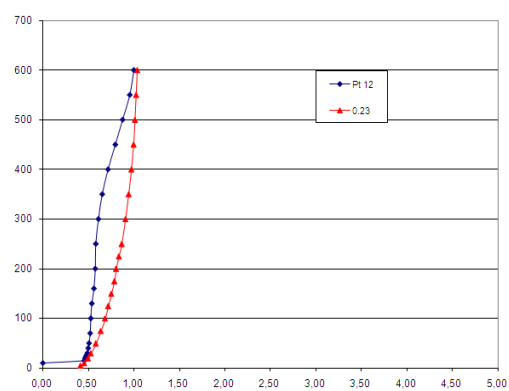


Figura 32 Pt 12 - Medições experimentais 2D e 3D comparativas com $p=0,23$



ANEXO C - Perfis de velocidade do vento coletados experimentalmente comparados com as normas analíticas NBR 6123(1988), EUROCODE-CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, ASCE 7-95:2005; AS/NZS:2002 e NBCC:2005 para os Experimentos I e II, Categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, medidos em 2D e 3D., normalizados a 275m e 440 m

Experimento I: Modelos hipotéticos A, B, C e D - morros isolados simétricos bi e tridimensionais.

Experimento II: Área complexa real contendo morro isolado assimétrico e três pontos em solo.

Cume Modelo A - inclinação 25°

Figura 33 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 25°, morro simétrico A, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275m

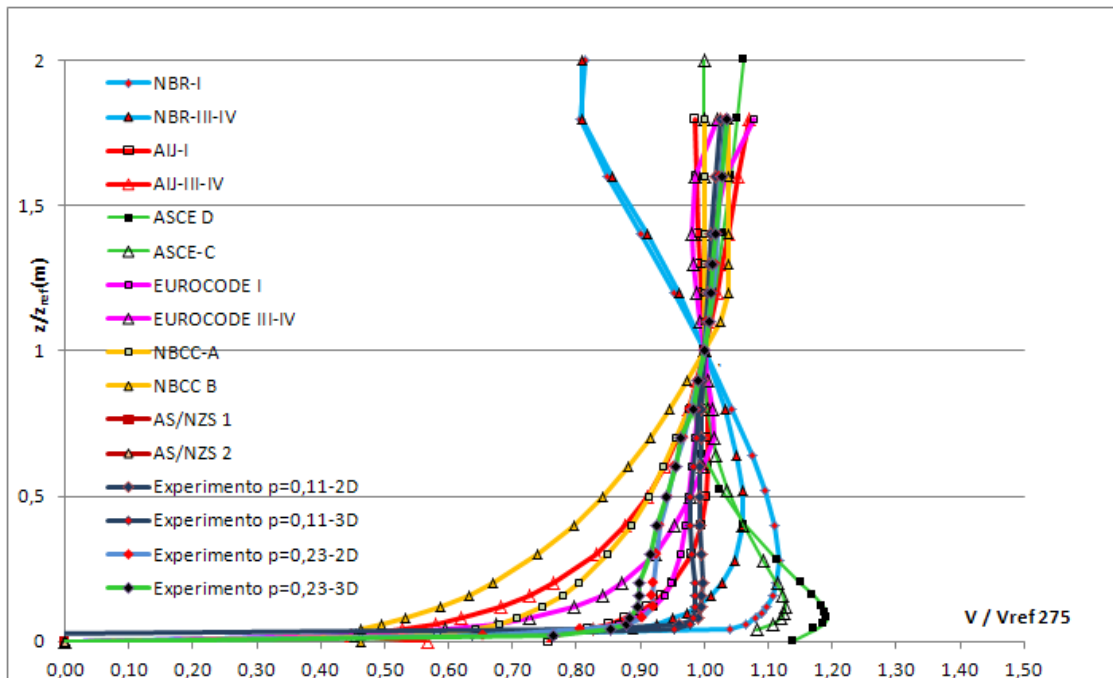
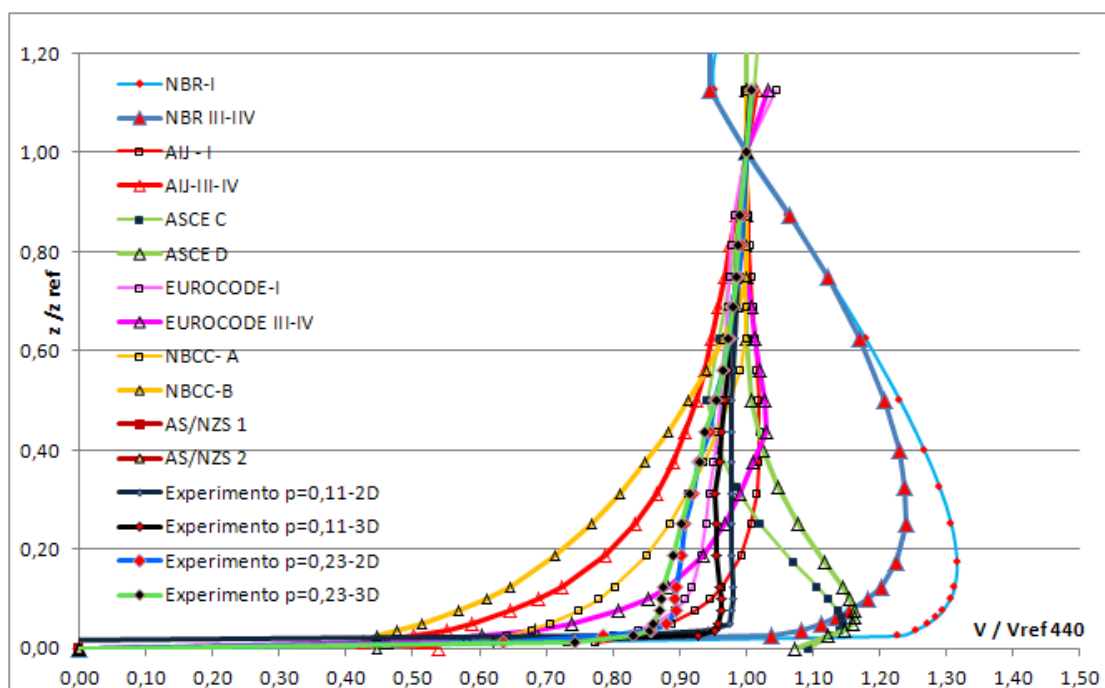


Figura 34 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 25°, morro simétrico A, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m



Cume Modelo B - inclinação 32°

Figura 35 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 32° - morro simétrico B, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

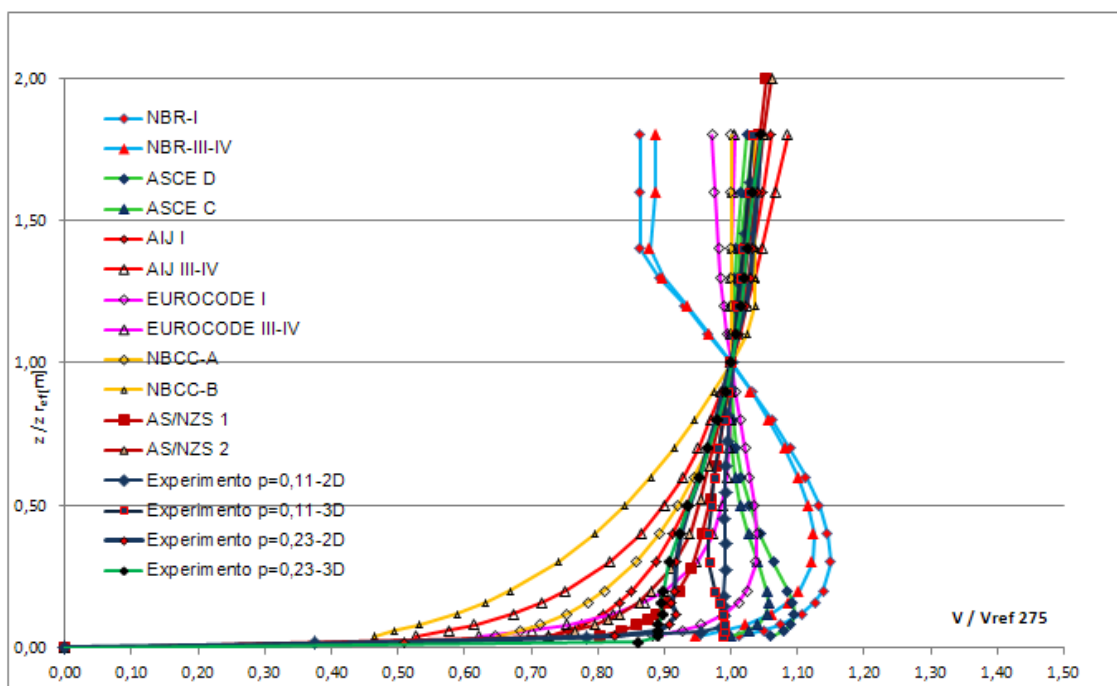
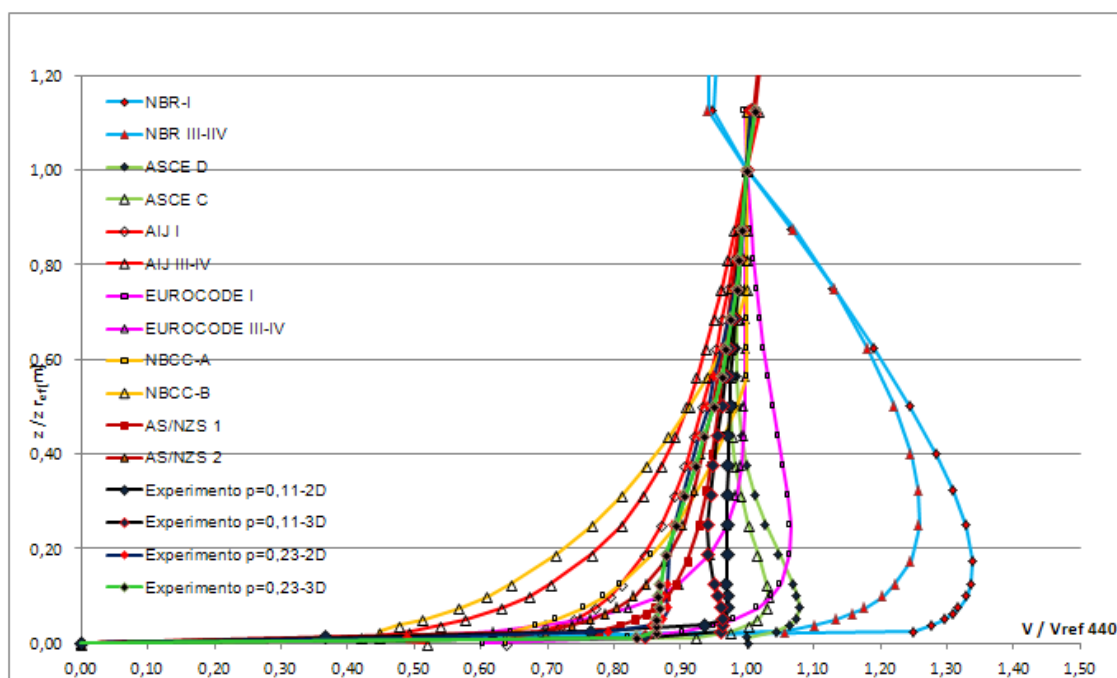


Figura 36 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 32° - morro simétrico B, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Cume Modelo C-inclinação 52

Figura 37 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 52° - morro simétrico C categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m⁰

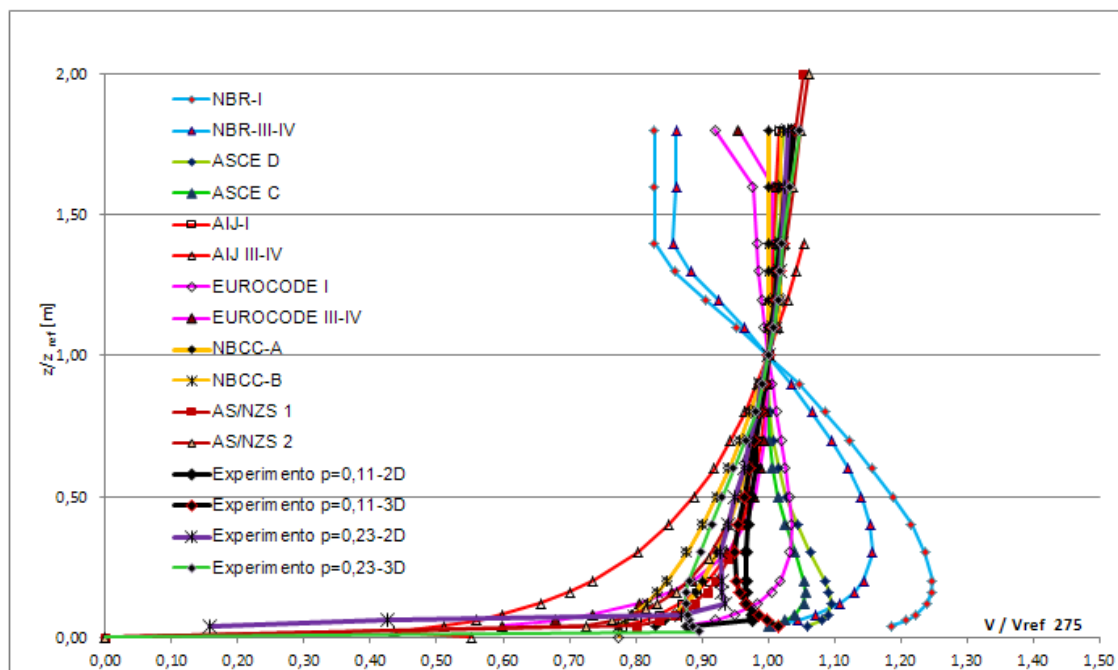
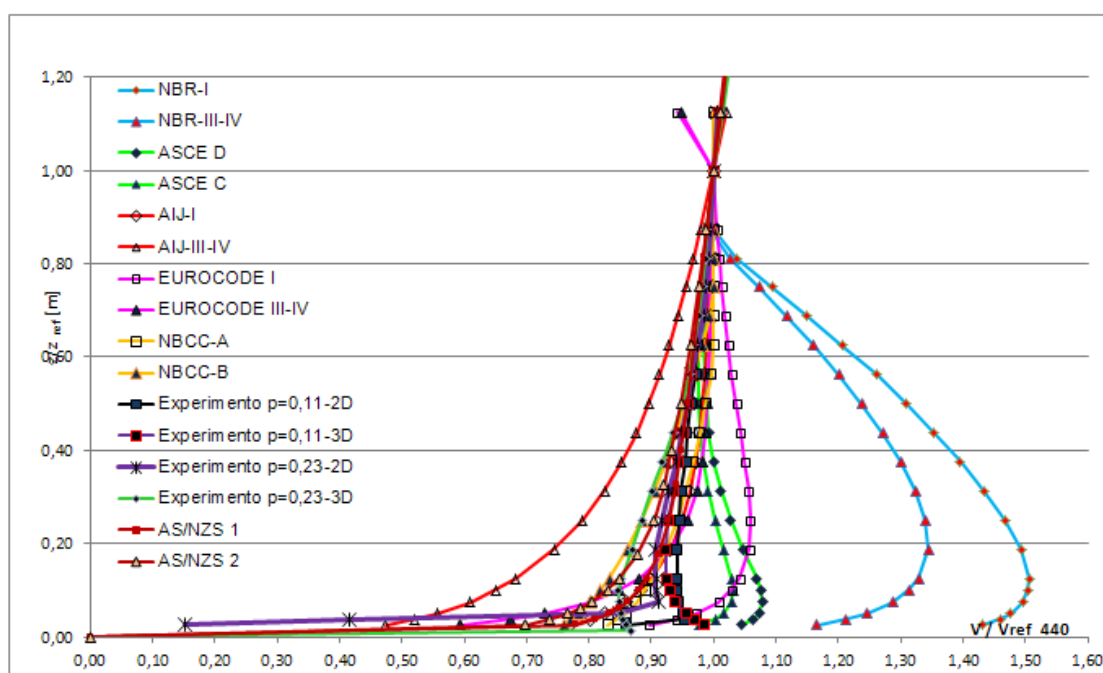


Figura 38 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 52° - morro simétrico C, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Cume Modelo D - inclinação 68°

Figura 39 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 68° - morro simétrico D, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m

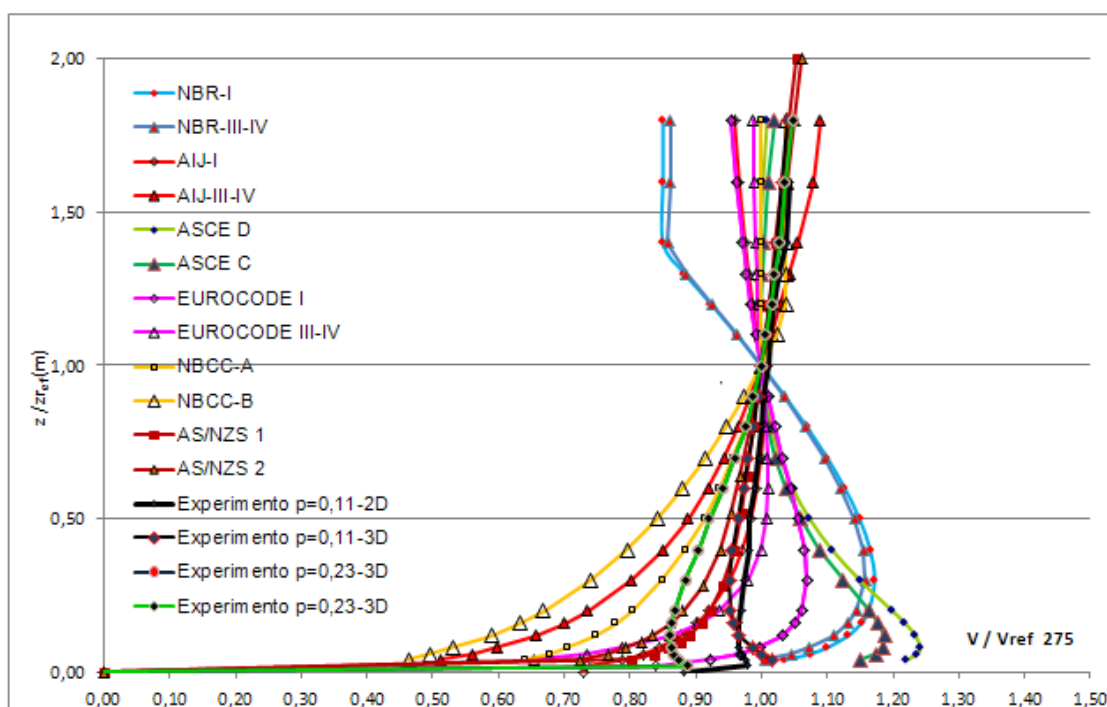
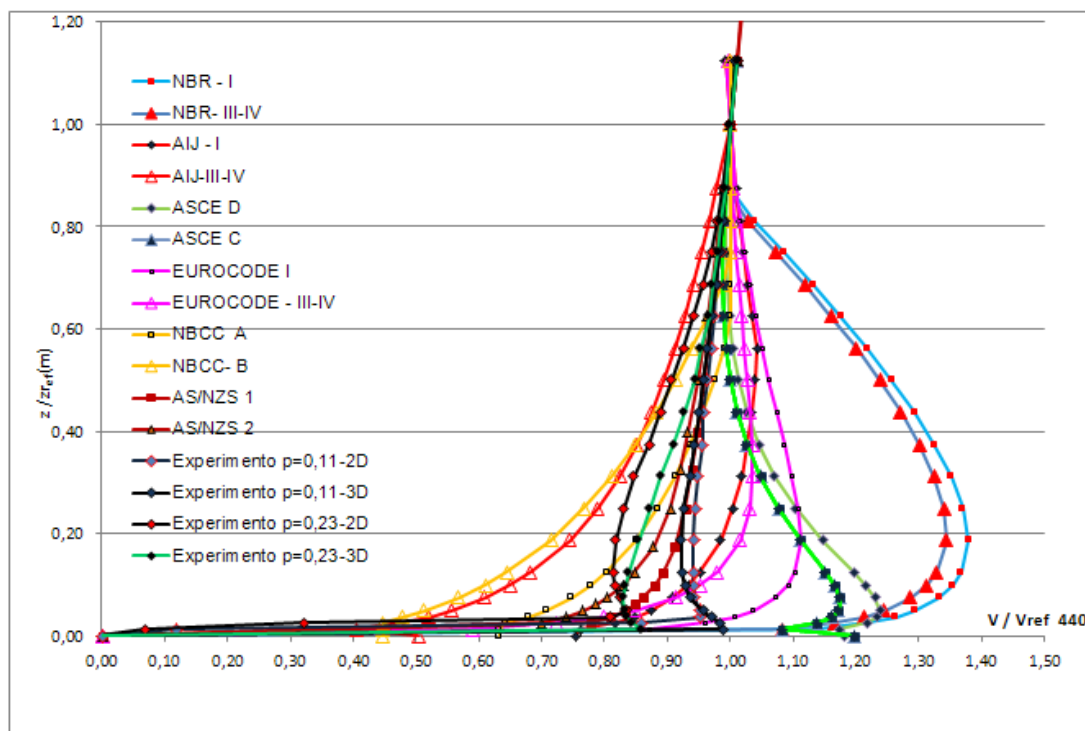


Figura 40 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 68° - morro simétrico D, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Cume - Ponto 01 Modelo Assimétrico-inclinação 34°

Figura 41 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34° - cume, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

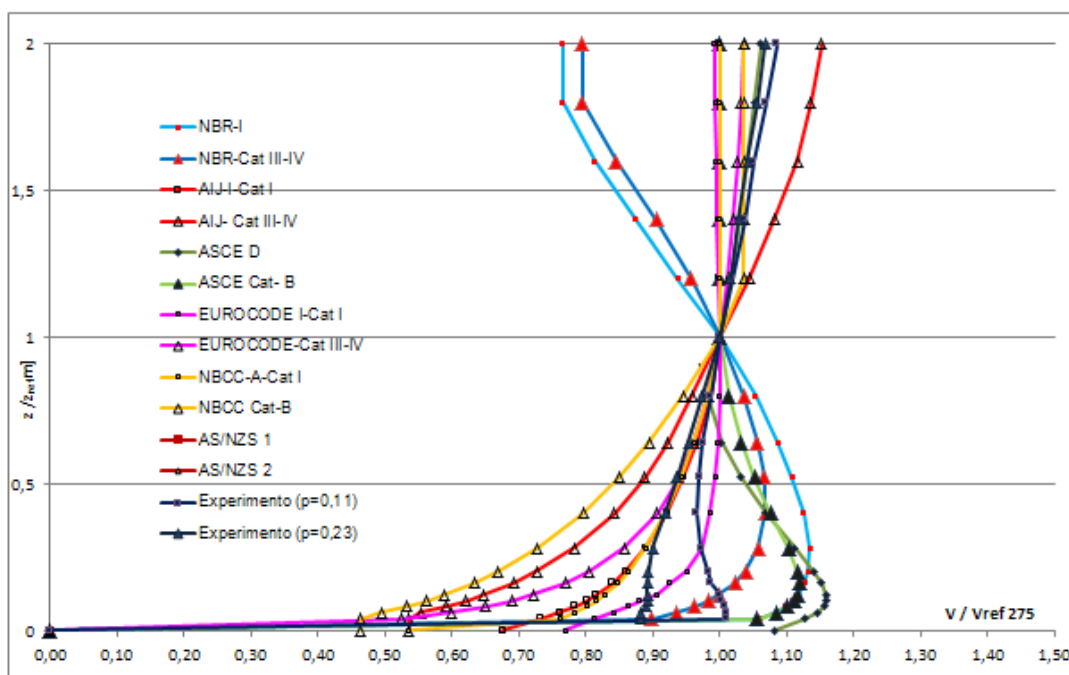
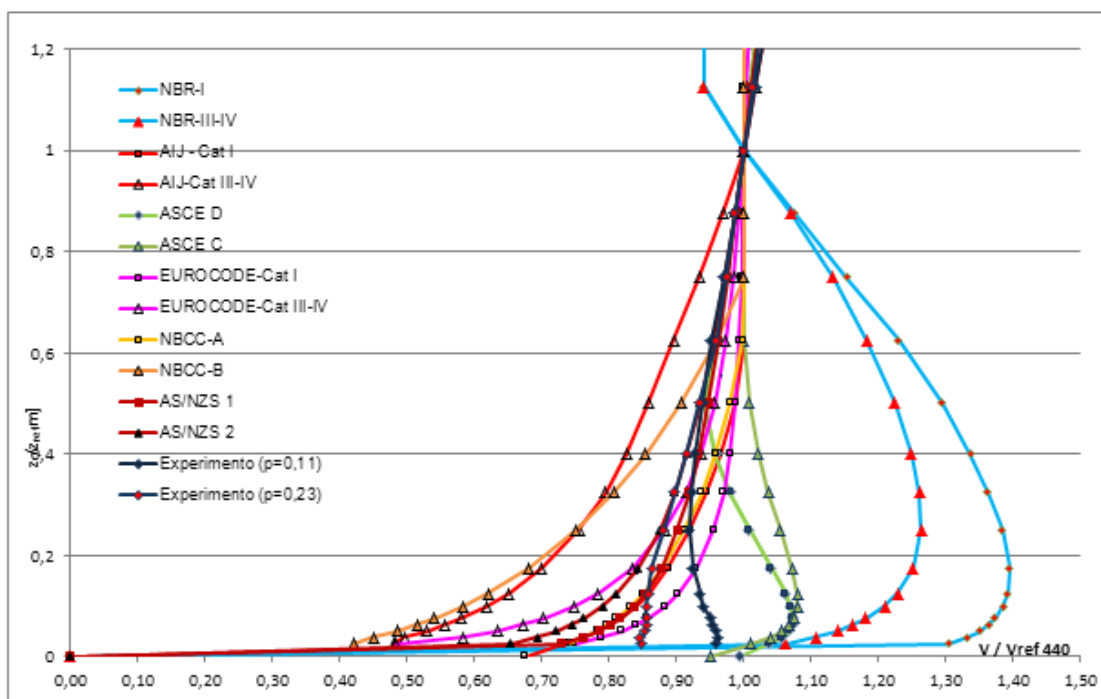


Figura 42 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- cume, categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m



Ponto 02 - Morro assimétrico-inclinação 34°

Figura 43 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 02 - categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

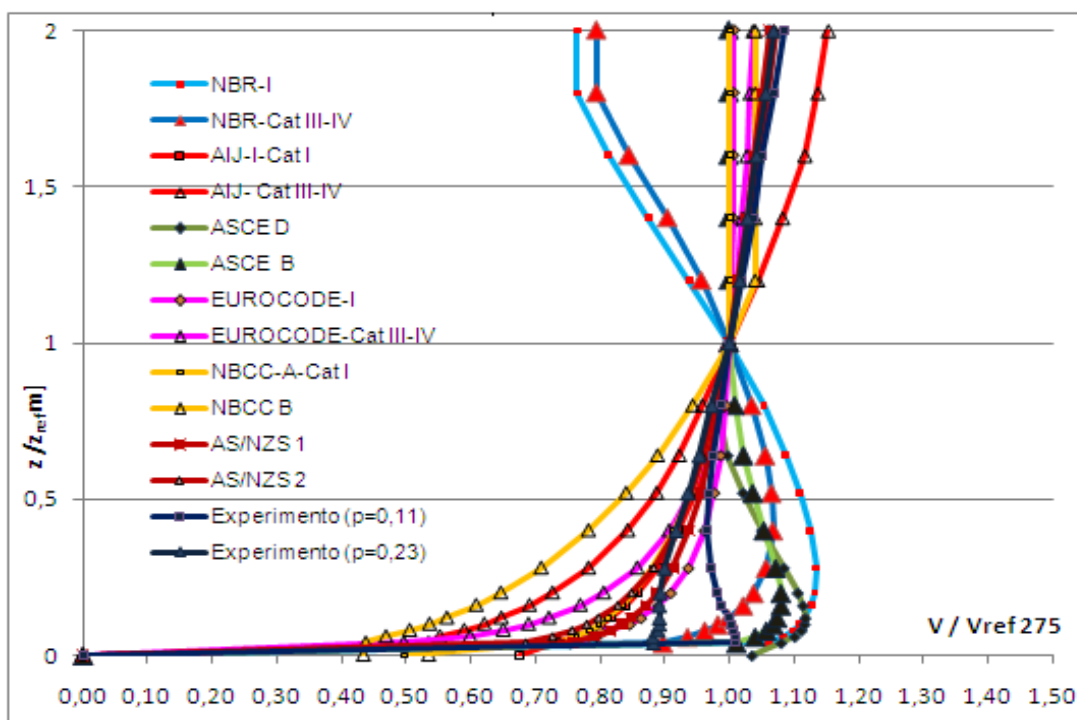
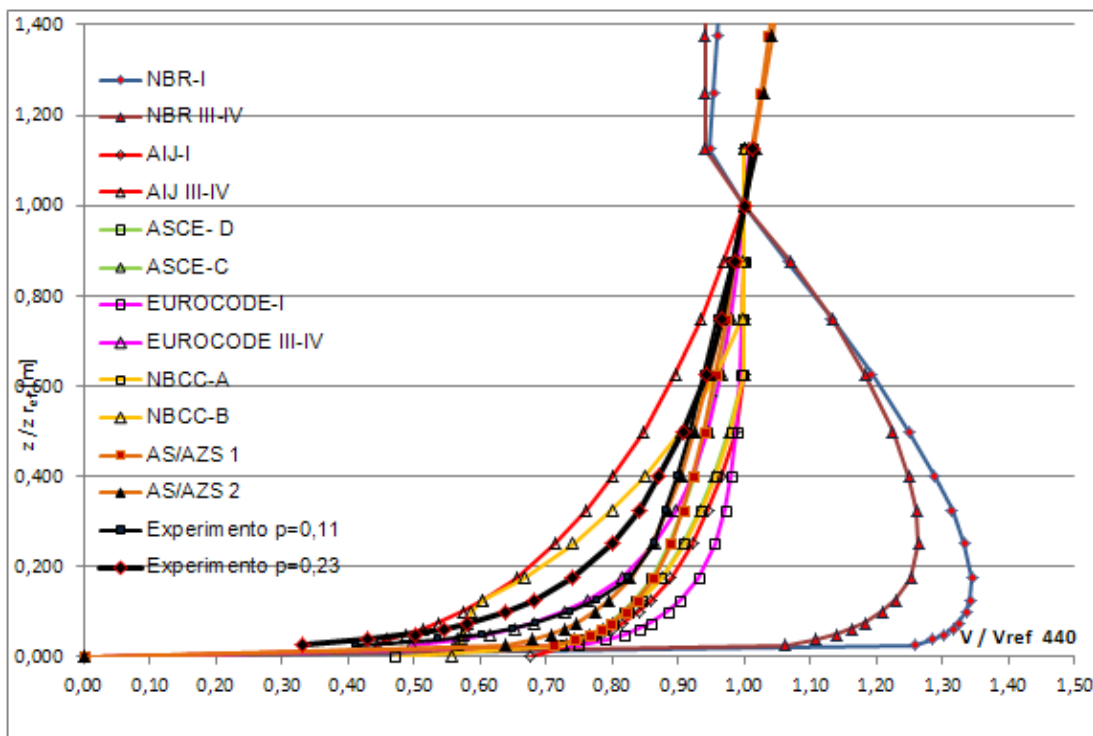


Figura 44 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 02 - categorias I, p=0,11 e III-IV, p=0,23, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Ponto 03 - Morro assimétrico-inclinação 34°

Figura 45 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 03 - categorias I, p=0,11 e III-IV, p=0,23, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

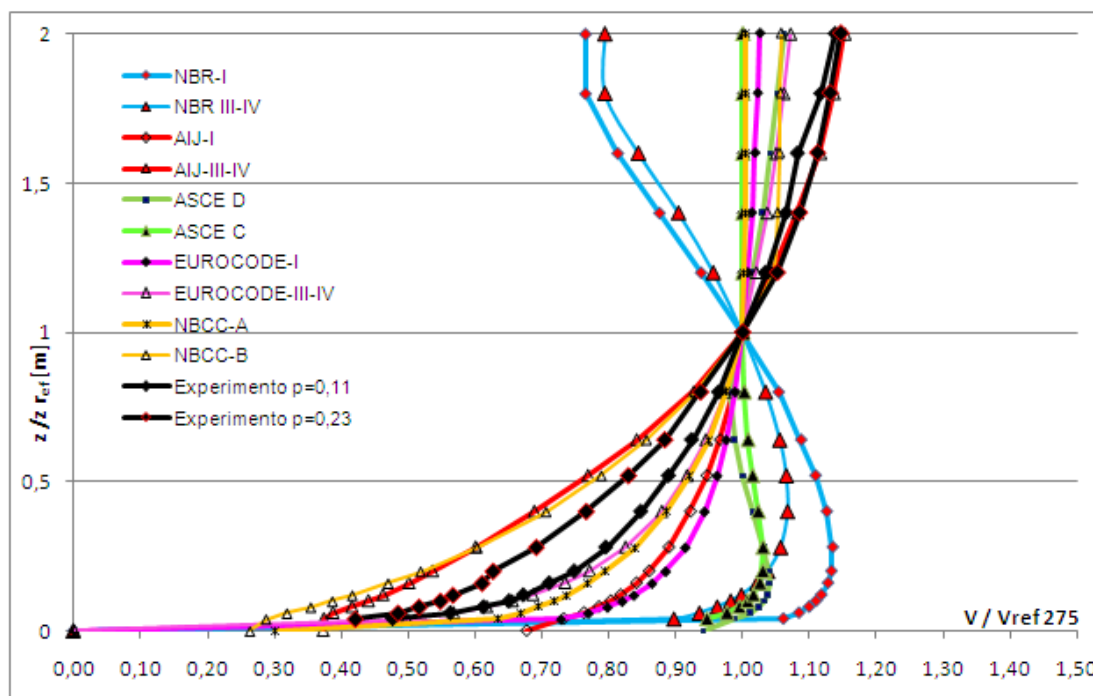
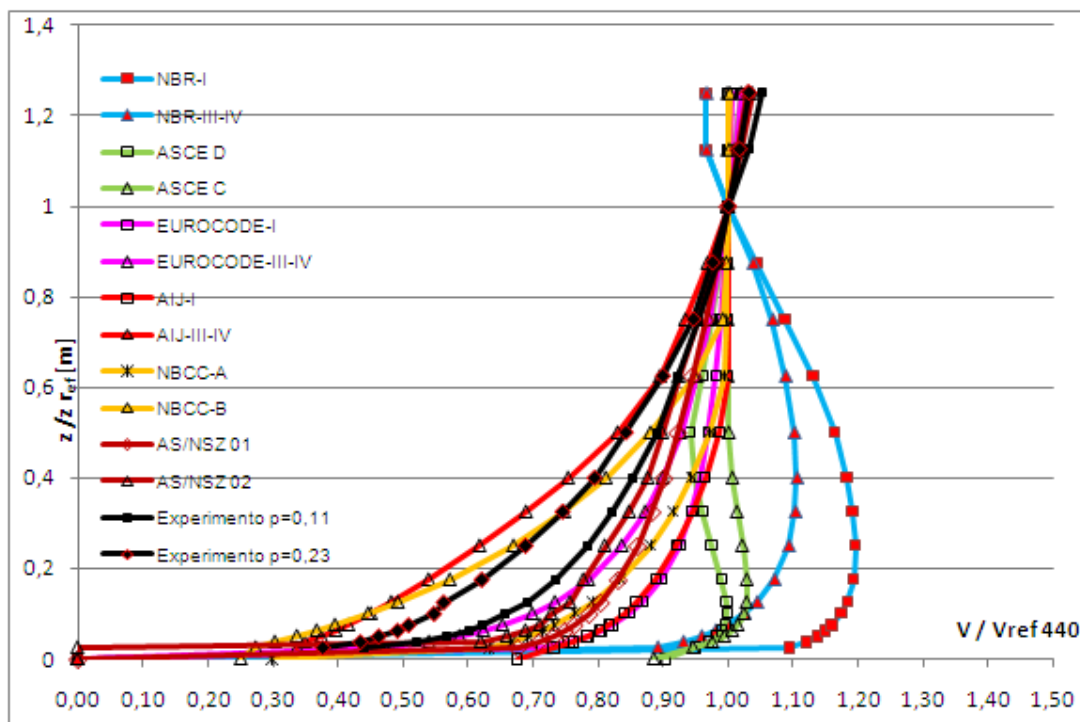


Figura 46 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 03 - categorias I, p=0,11 e III-IV, p=0,23, 2D e 3D, normalizados a 440 m



Ponto 04 - Morro assimétrico-inclinação 34°

Figura 47 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 04 - categorias I, p=0,11 e III-IV, p=0,23, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

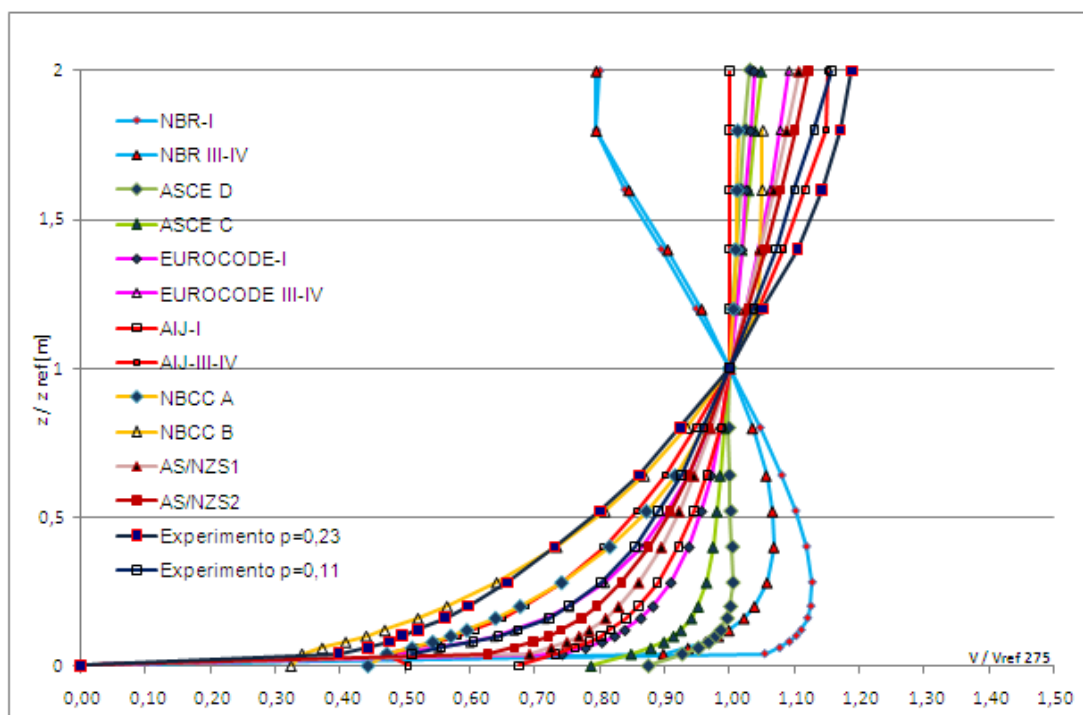
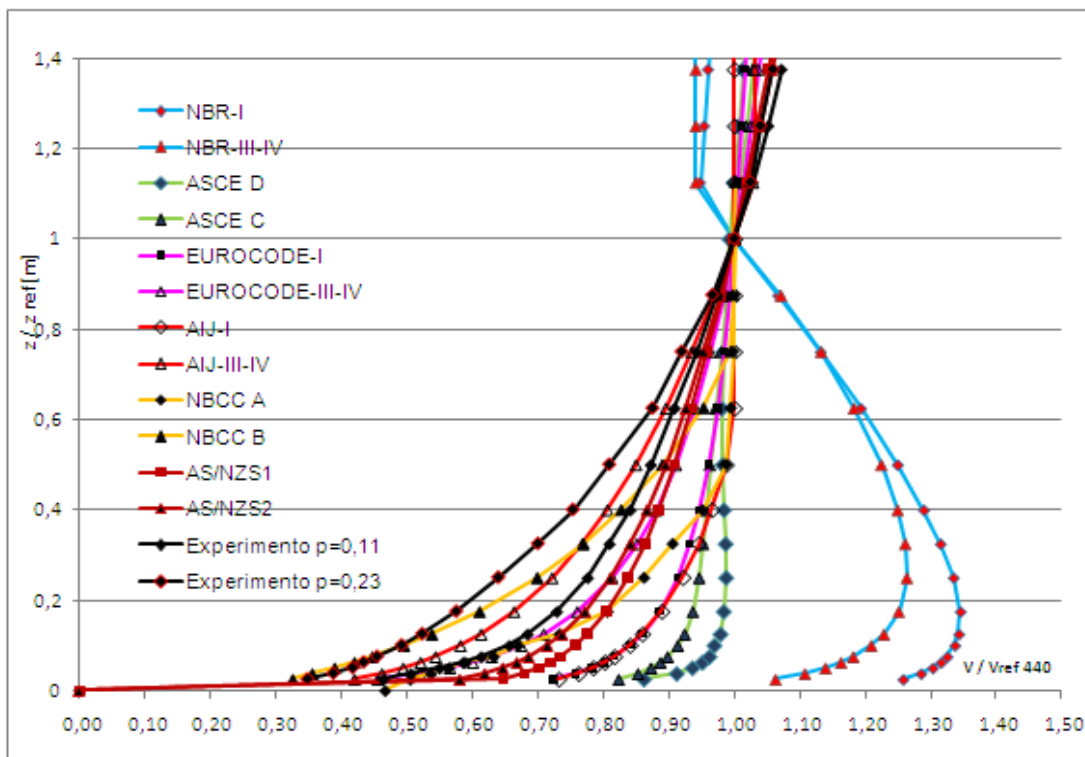


Figura 48 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 04 - categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m



Ponto 05 - Morro assimétrico-inclinação 34°

Figura 49 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 05 - categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 3D, normalizados a 275 m.

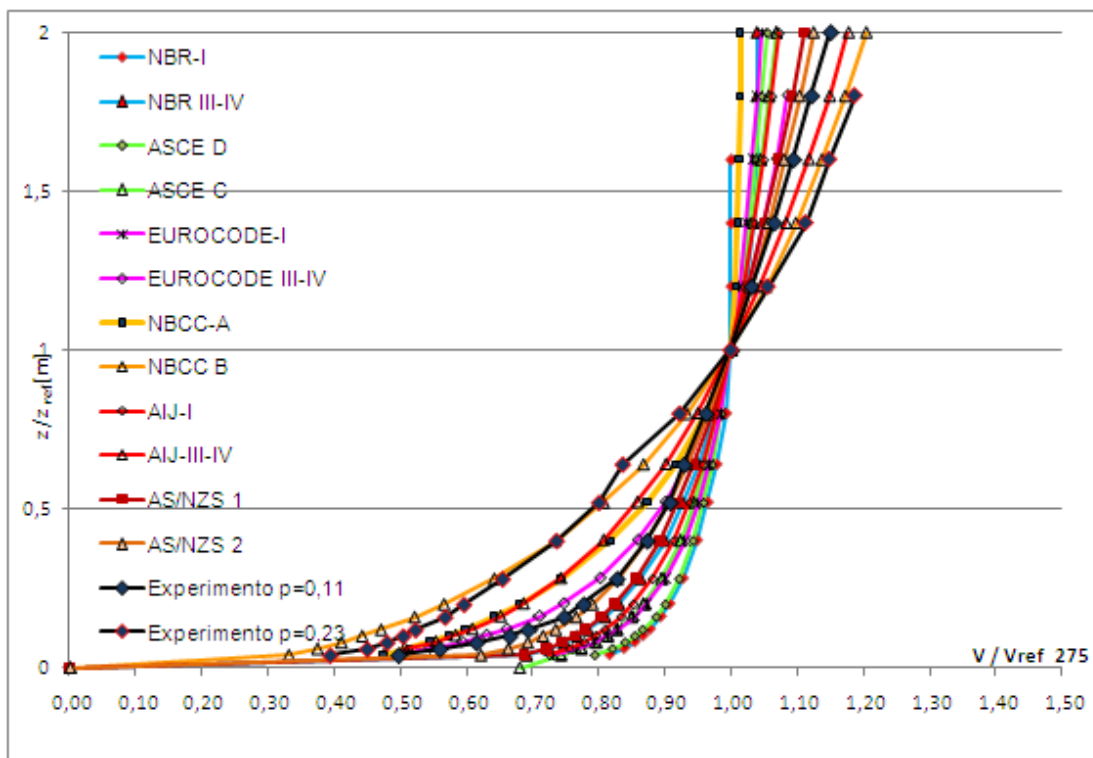
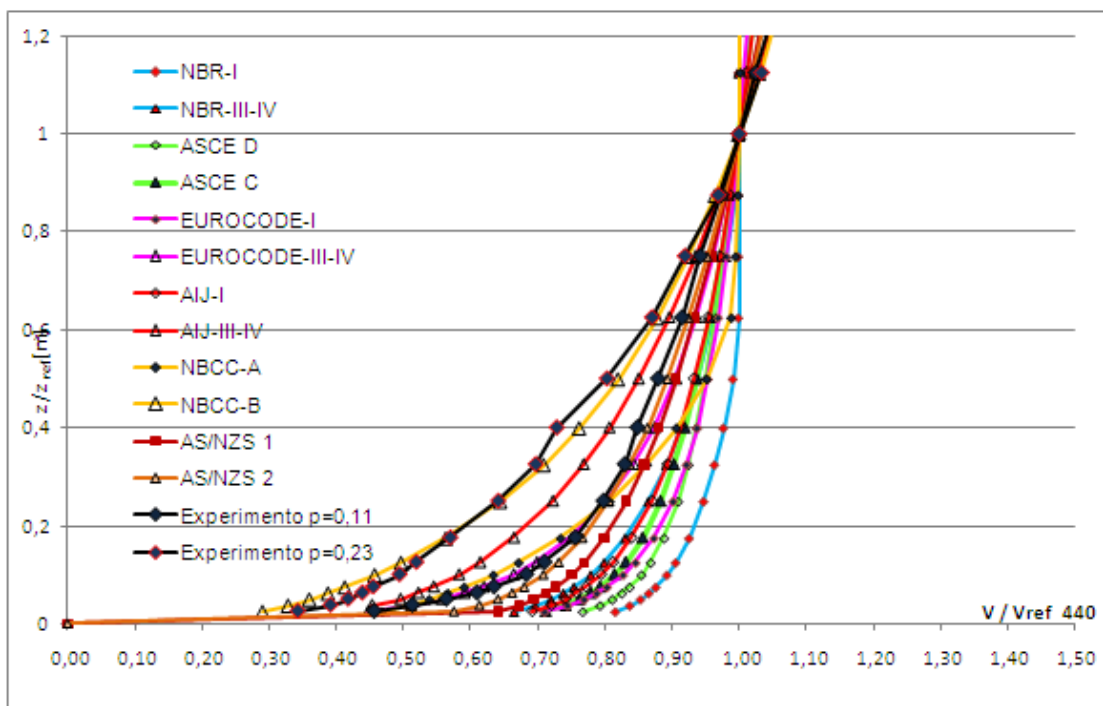


Figura 50 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 05 - categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Ponto 06 - Morro assimétrico-inclinação 34°

Figura 51 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 06 - categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 3D, normalizados a 275 m.

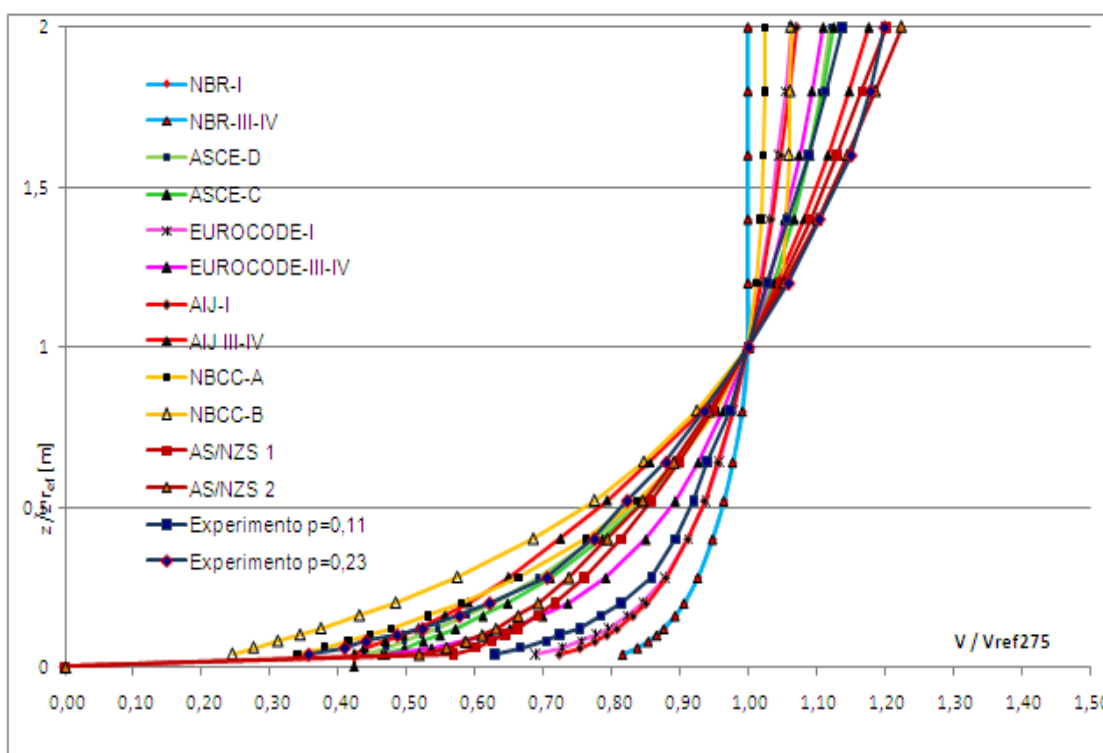
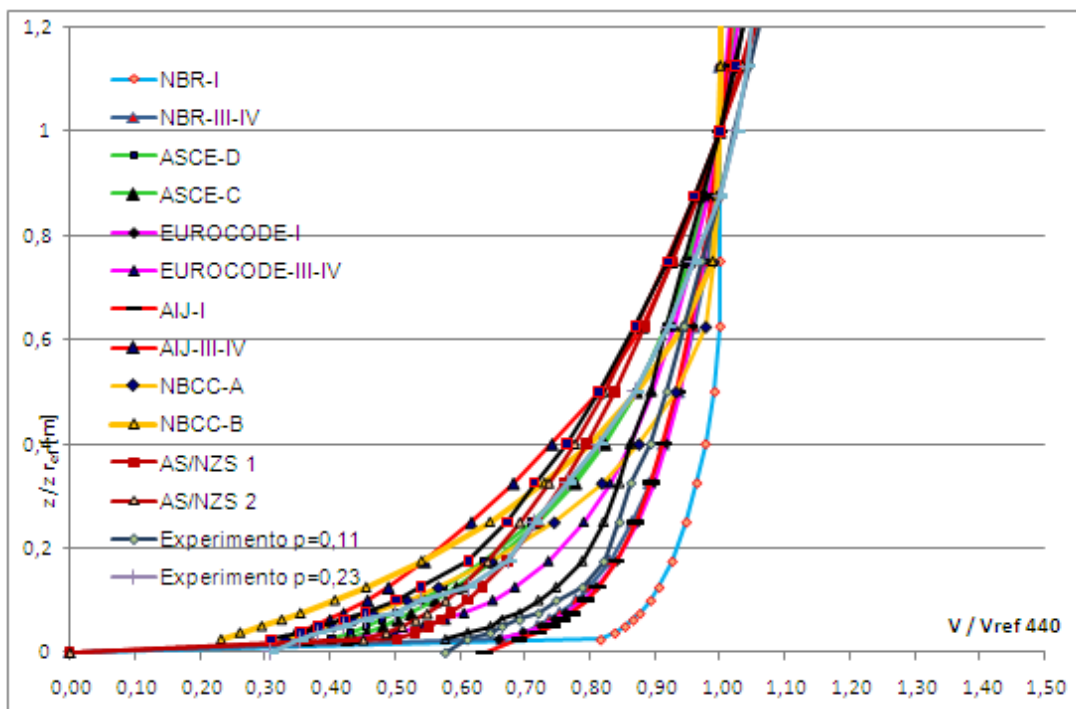


Figura 52 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 06- categorias I, p=0,11 e III-IV, p=0,23, 3D, normalizados a 440 m.



Ponto 07 - Morro assimétrico-inclinação 34°

Figura 53 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 07- categorias I, p=0,11 e III-IV, p=0,23, 3D, normalizados a 275 m.

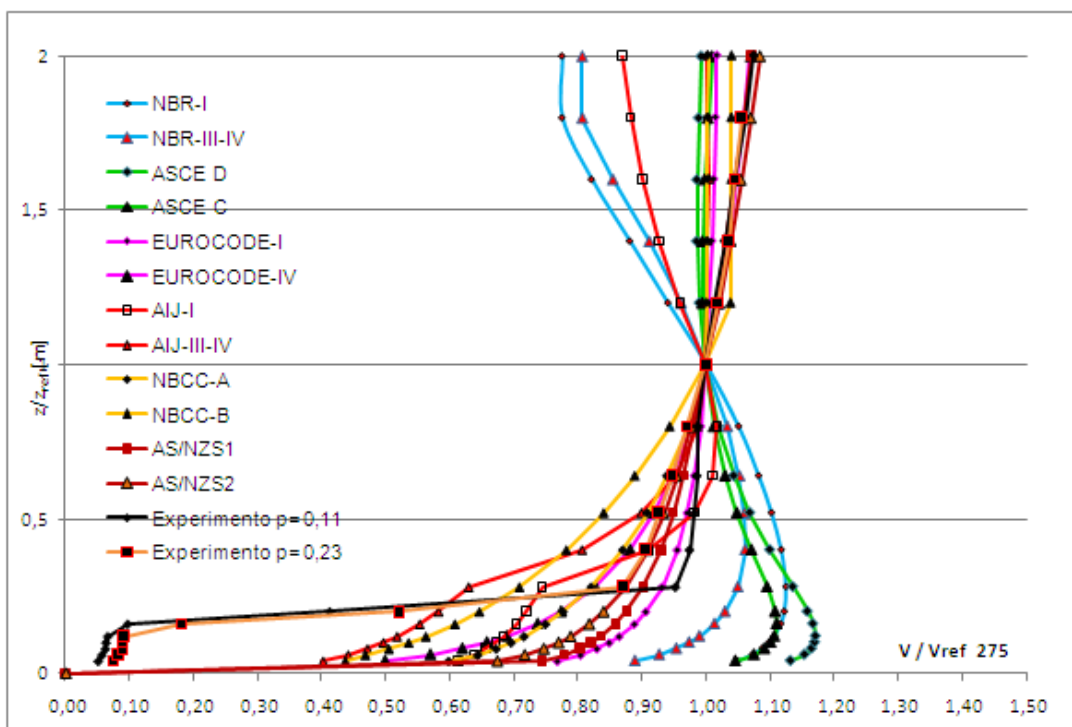
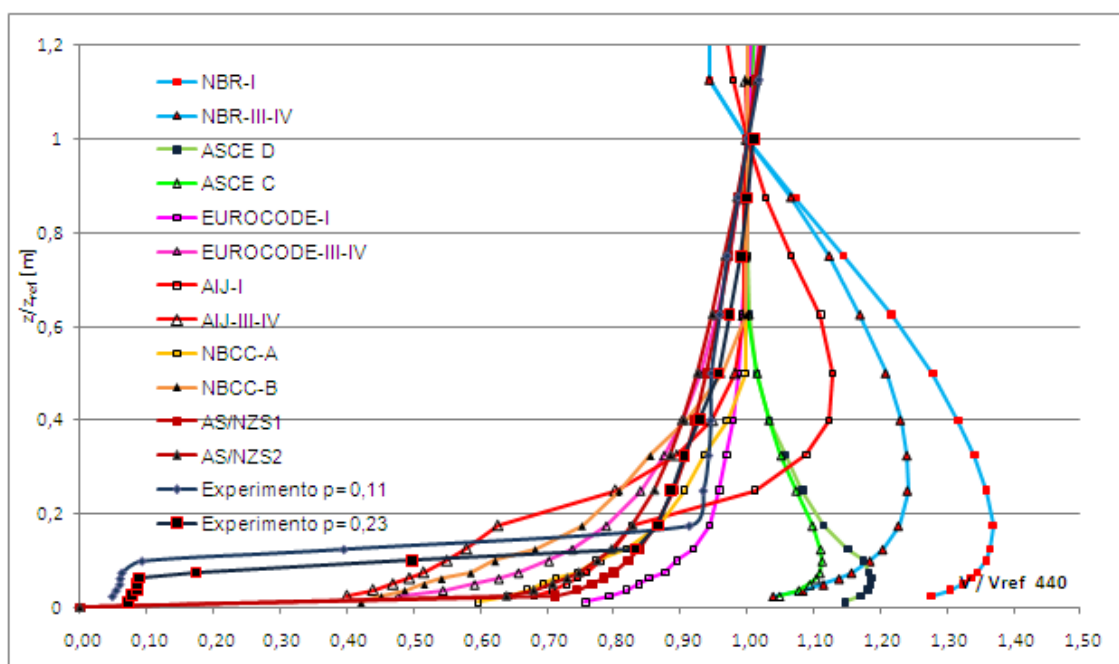


Figura 54 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34° - Ponto 07 - categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Ponto 08 - Morro assimétrico-inclinação 34°

Figura 55 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34° - Ponto 08 - categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

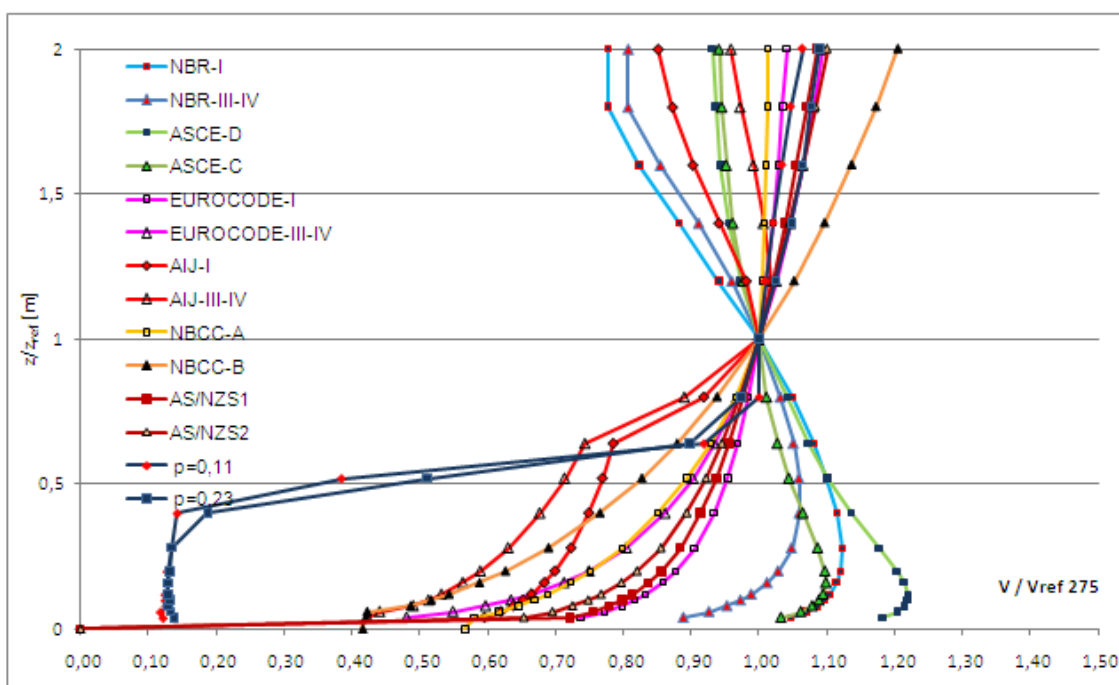
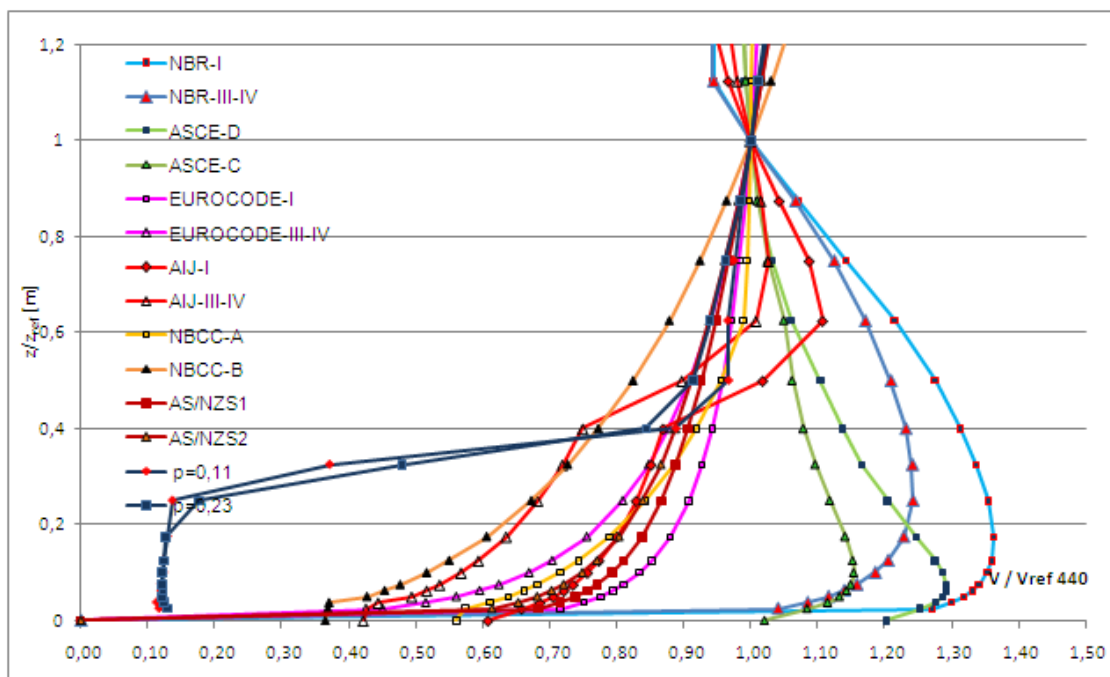


Figura 56 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 08- categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 3D, normalizados a 440 m.



Ponto 09 - Modelo Assimétrico-inclinação 34°

Figura 57 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 09 - categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

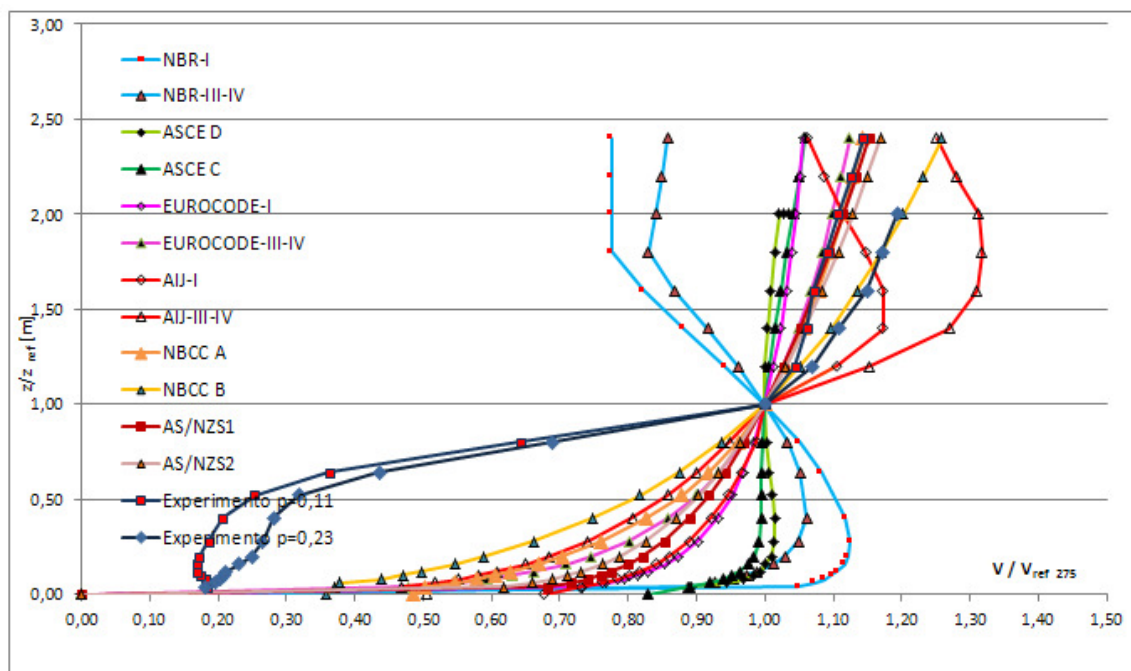
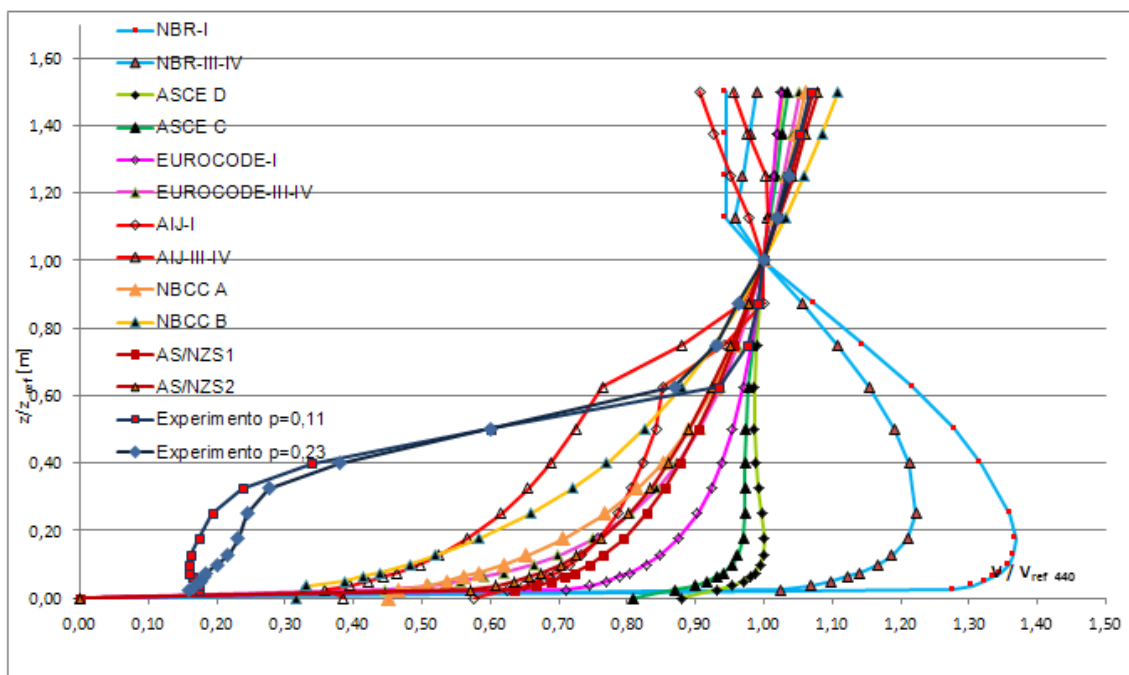
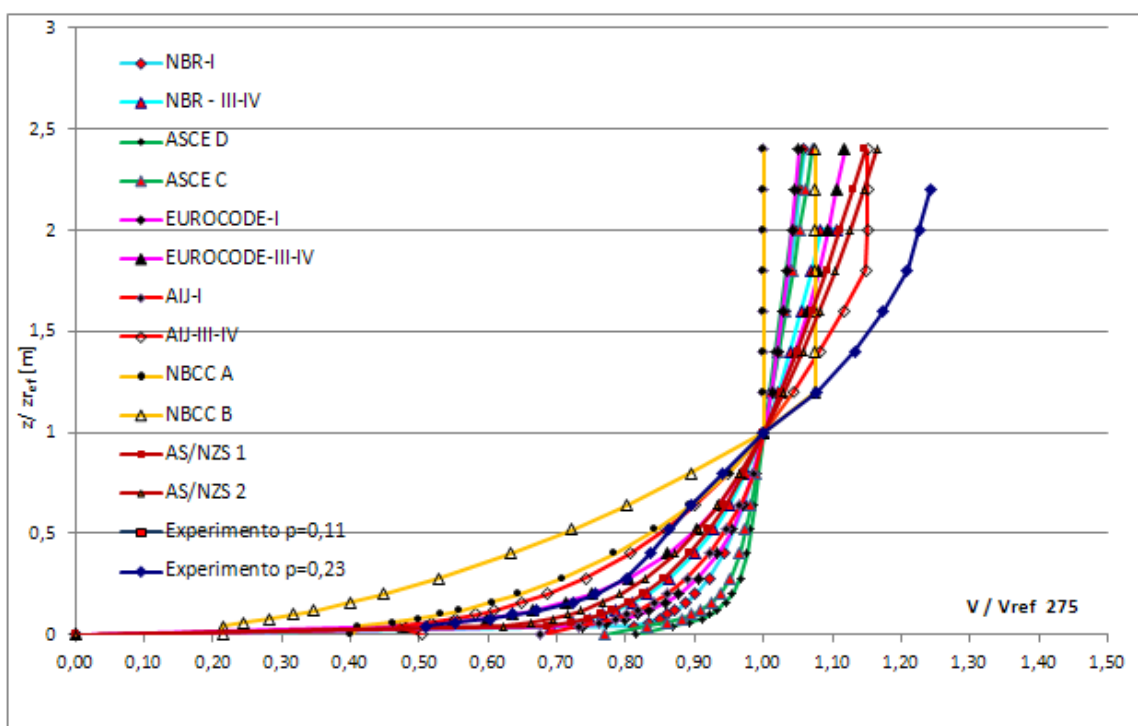


Figura 58 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 34°- Ponto 09 – categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.

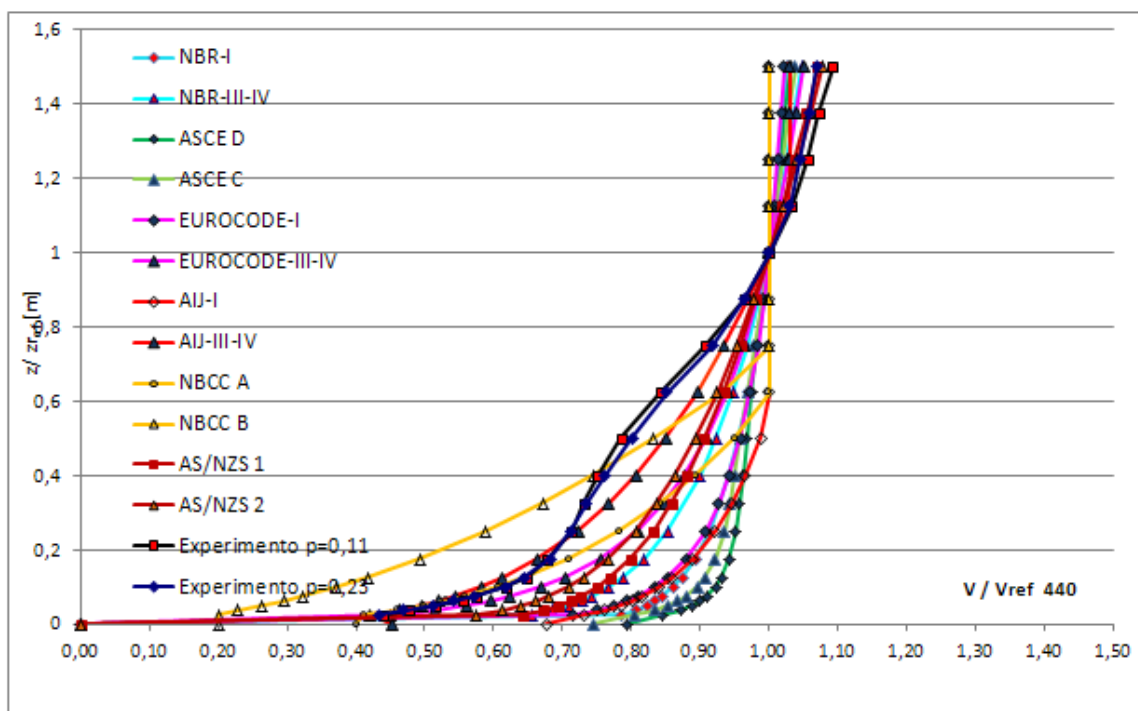


Pontos em solo internos à área complexa - Ponto 10

Figura 59 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos - Ponto 10 - em solo, categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m



. Figura 60 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos - Ponto 10 - em solo, categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Ponto 11

Figura 61 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos - Ponto 11 - em solo, categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

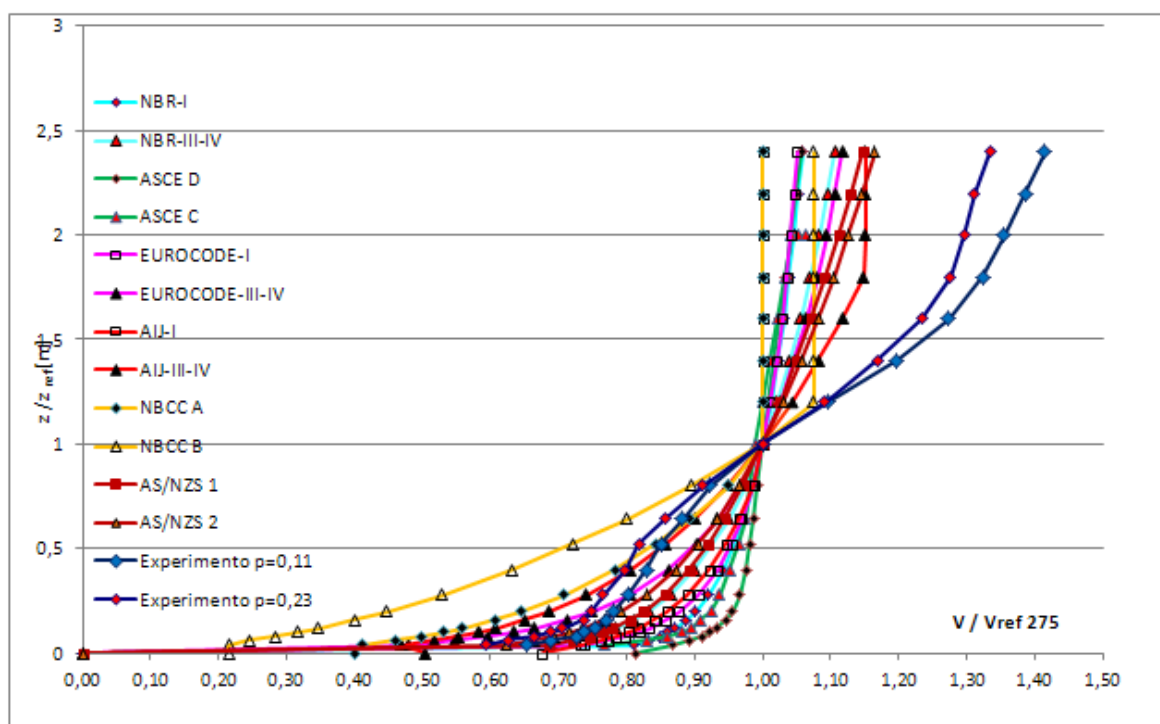
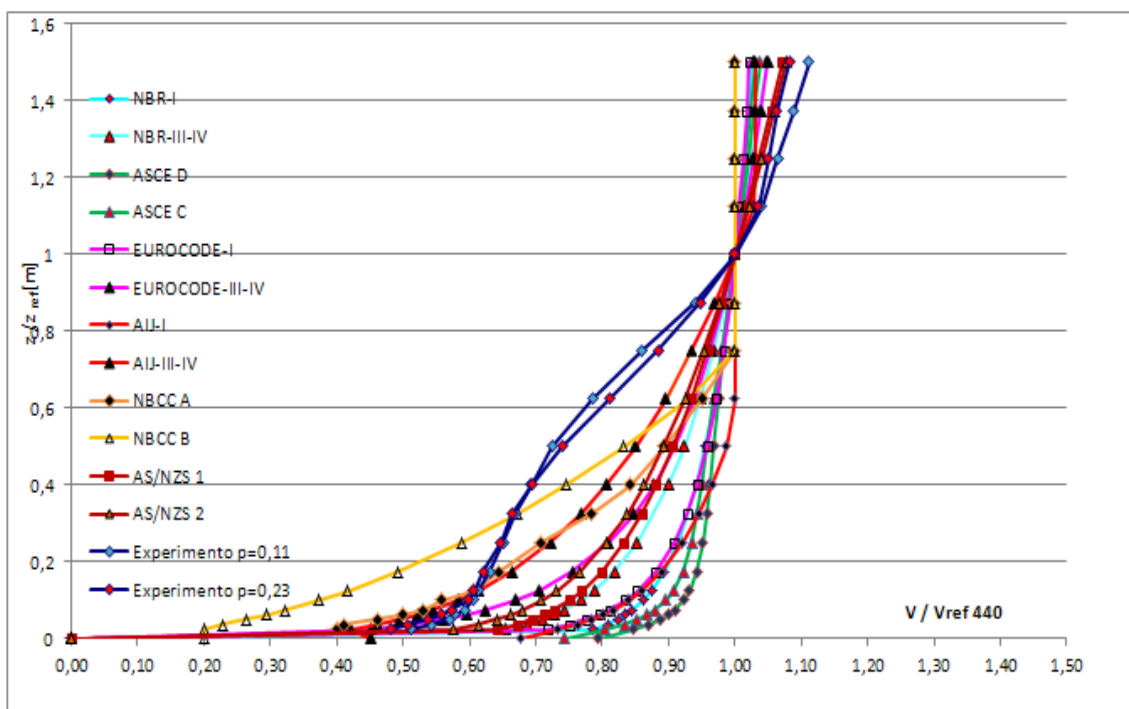


Figura 62 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos - Ponto 11 - em solo, categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



Ponto 12

Figura 63 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos - Ponto 12 - em solo, categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 275 m.

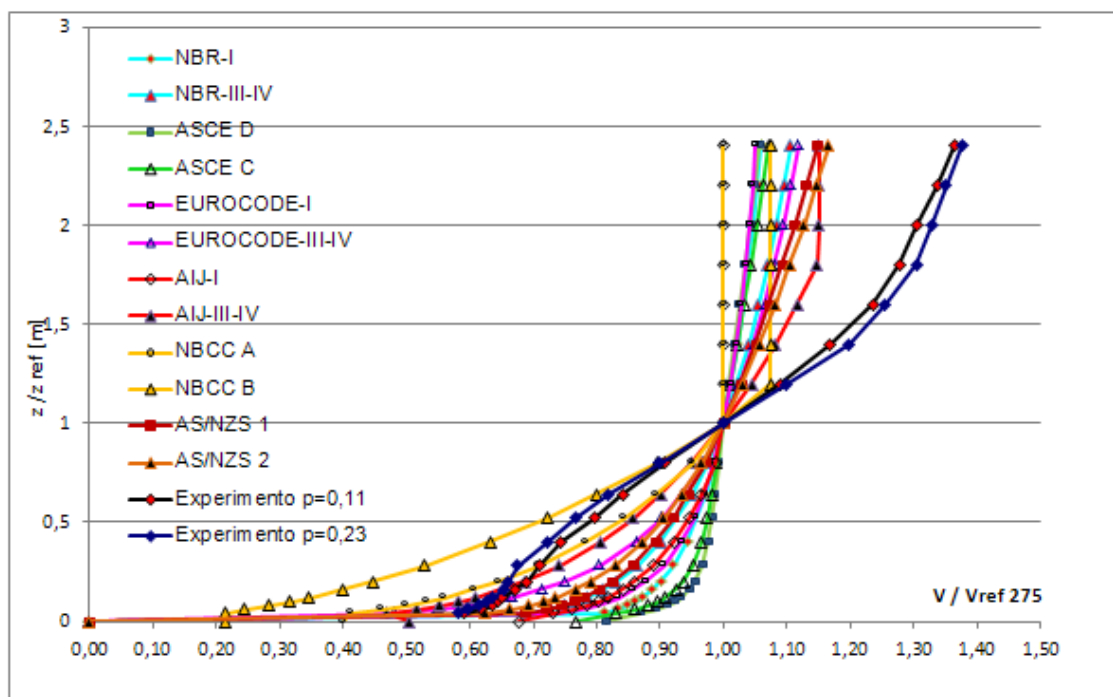
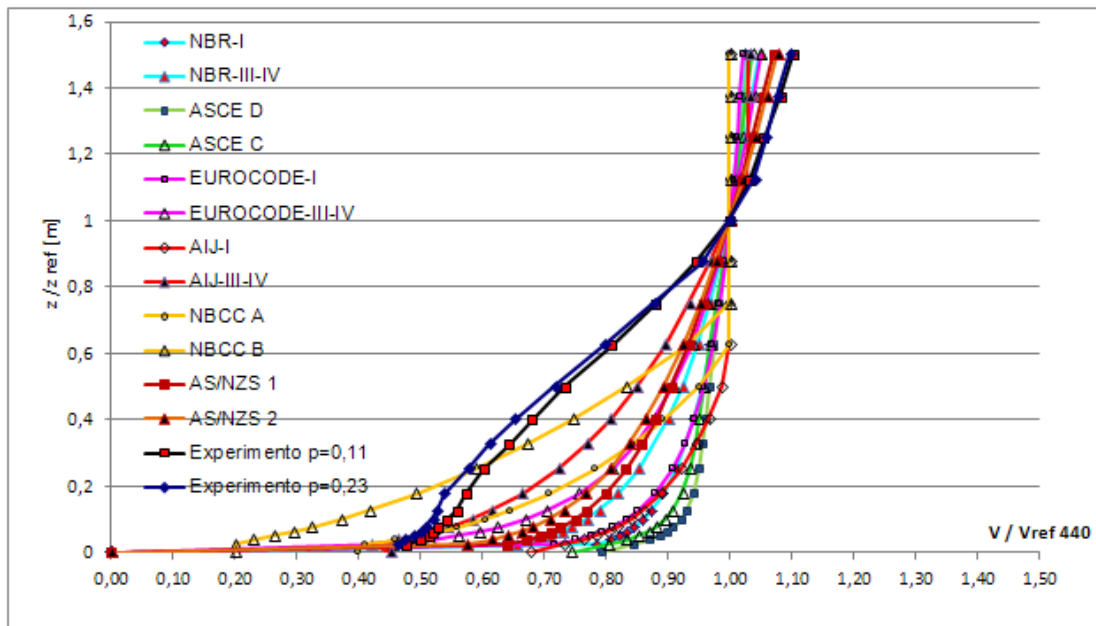


Figura 64 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos - Ponto 12 - em solo, categorias I, $p = 0,11$ e III-IV, $p = 0,23$, 2D e 3D, normalizados a 440 m.



ANEXO D - Perfis da velocidade de vento coletadas em Túnel de vento comparadas com as Normas Analíticas NBR 6123(1988), EUROCODE-CEN TC 250: 2002, AIJ: 2004, ASCE 7-95:2005 e NBCC:2005 para os Experimentos abaixo examinados, sem normalização:

Experimento I: Modelos Hipotéticos A, B, C e D - Morros isolados simétricos bi e tridimensionais.

Cume Modelo A-inclinação 25°

Figura 65 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 25°, morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ - 2D sem normalização.

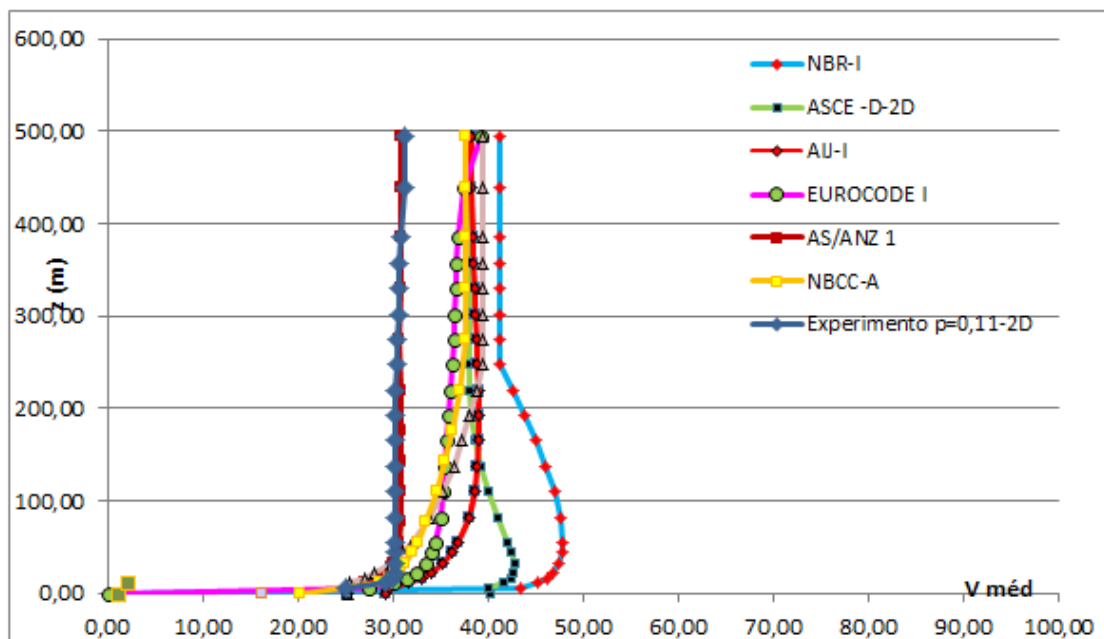


Figura 66 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 25°, morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ - 3D, sem normalização.

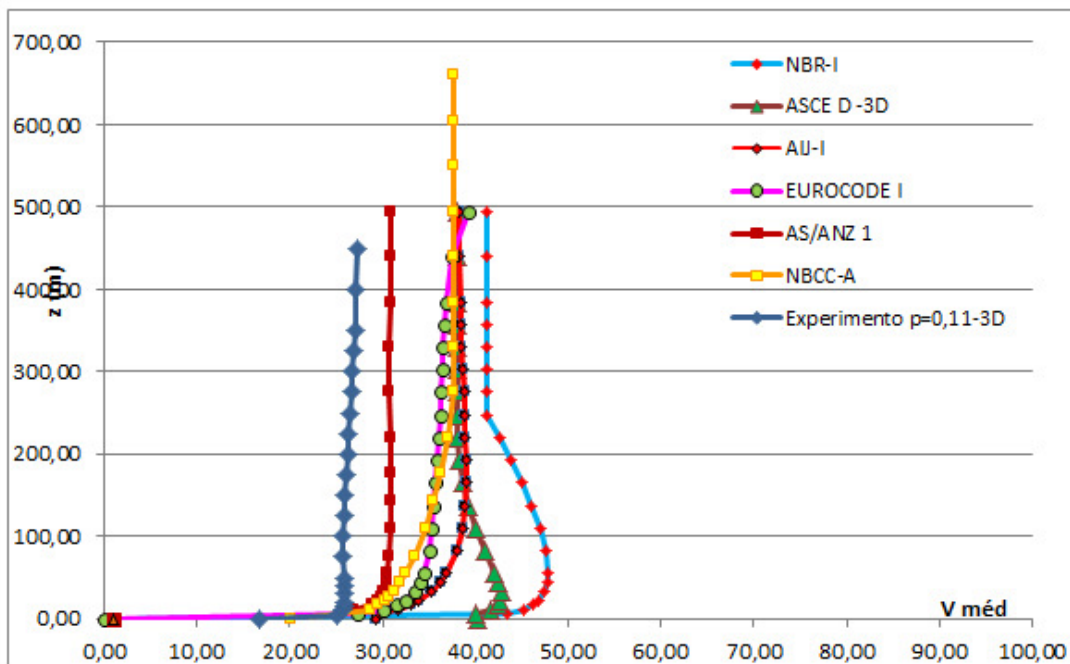


Figura 67 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 25°, morro simétrico, categorias III-V, $p=0,23$ - 2D, sem normalização.

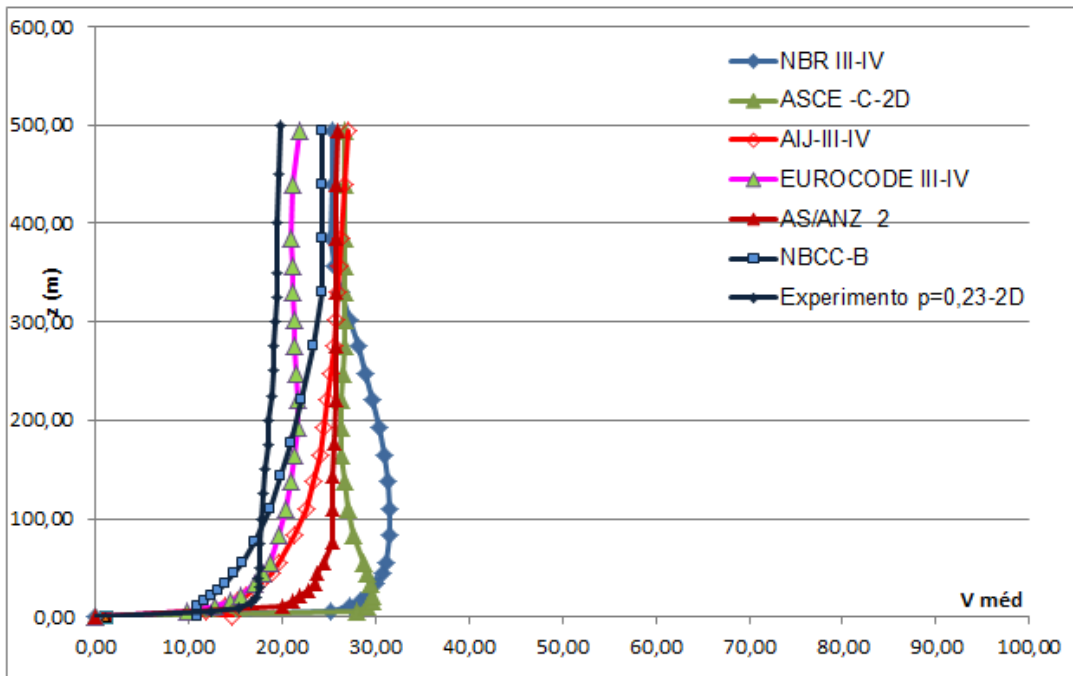
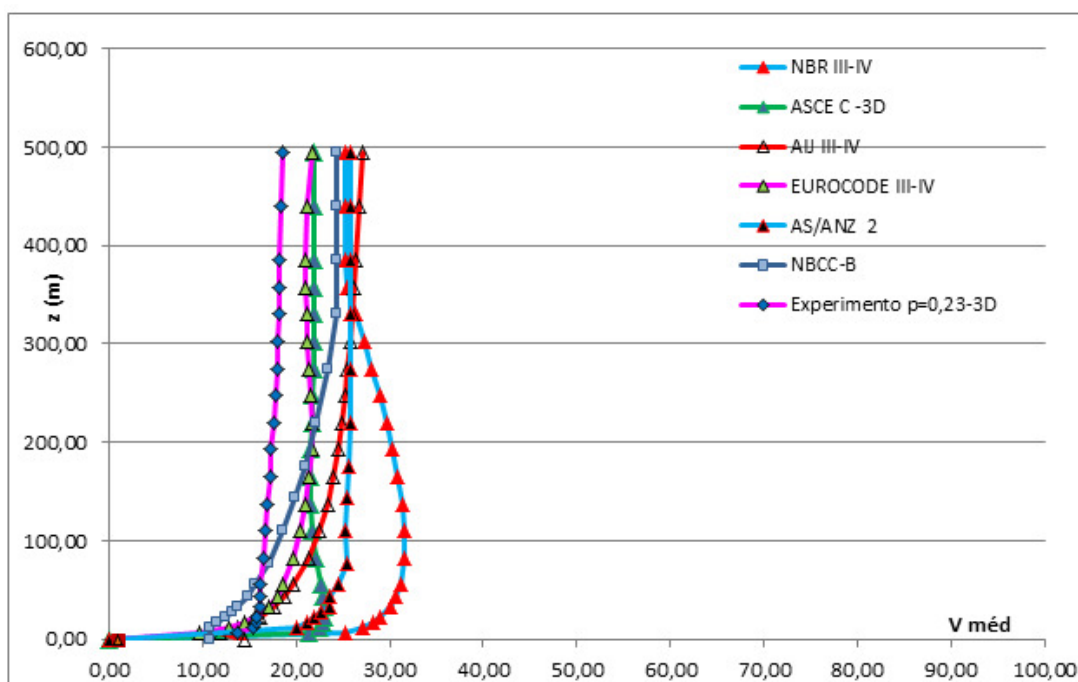


Figura 68 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 25°, morro simétrico, categorias III-V, $p=0,23$ - 3D, sem normalização



Cume Modelo B - inclinação 32°

Figura 69 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 32°, morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ - 2D, sem normalização.

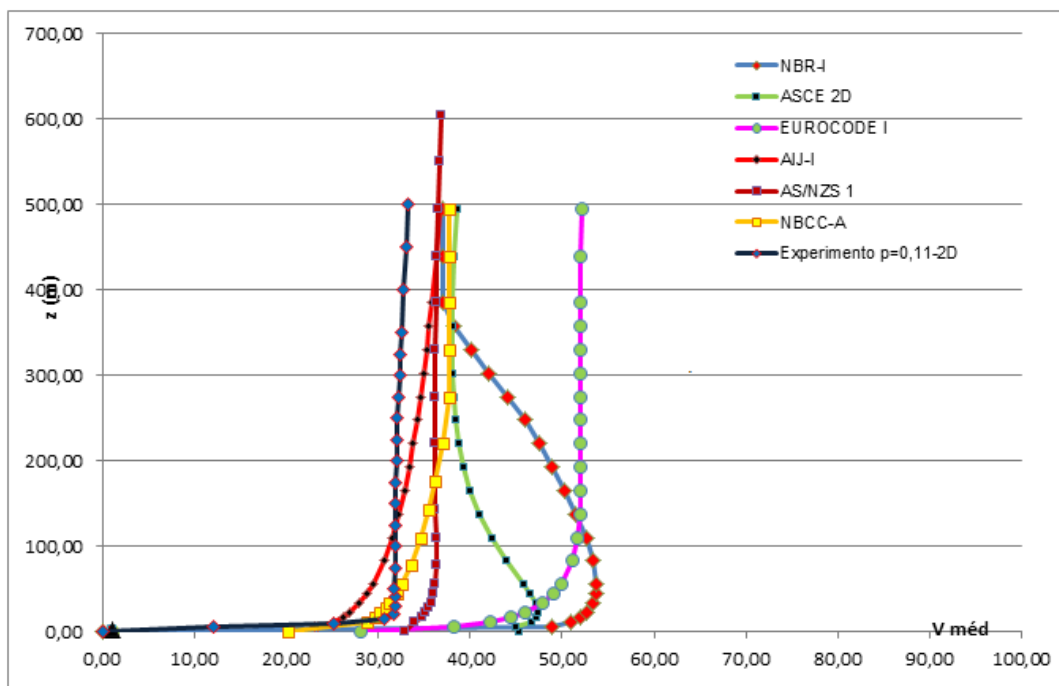


Figura 70 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 32° , morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ - 3D, sem normalização.

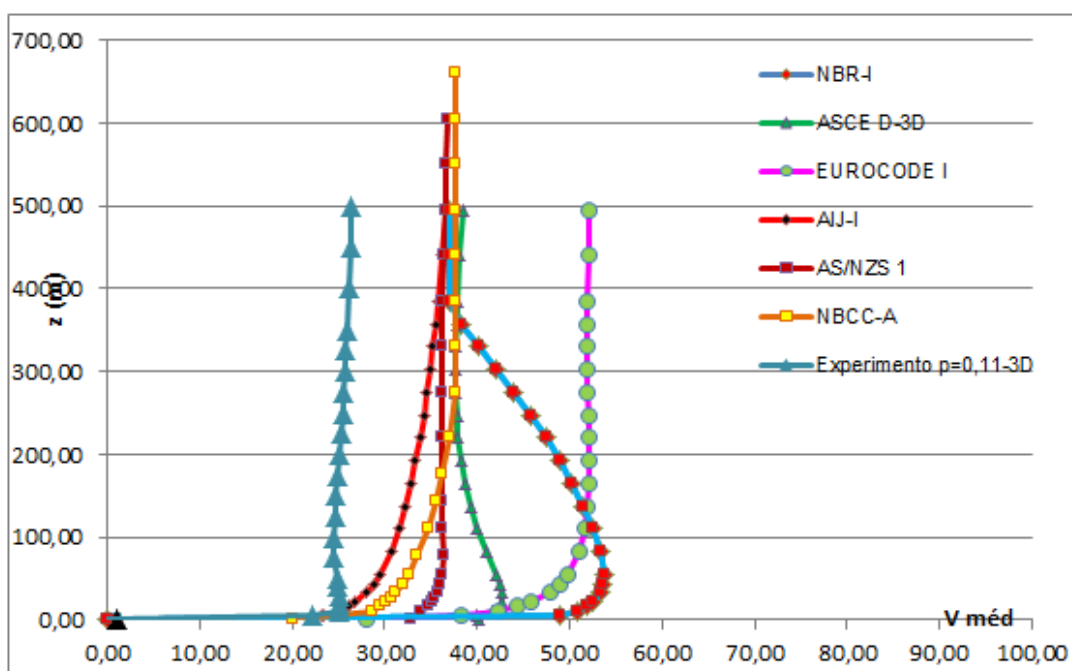


Figura 71 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 32° , morro simétrico, categorias III-IV, $p=0,23$ - 2D, sem normalização.

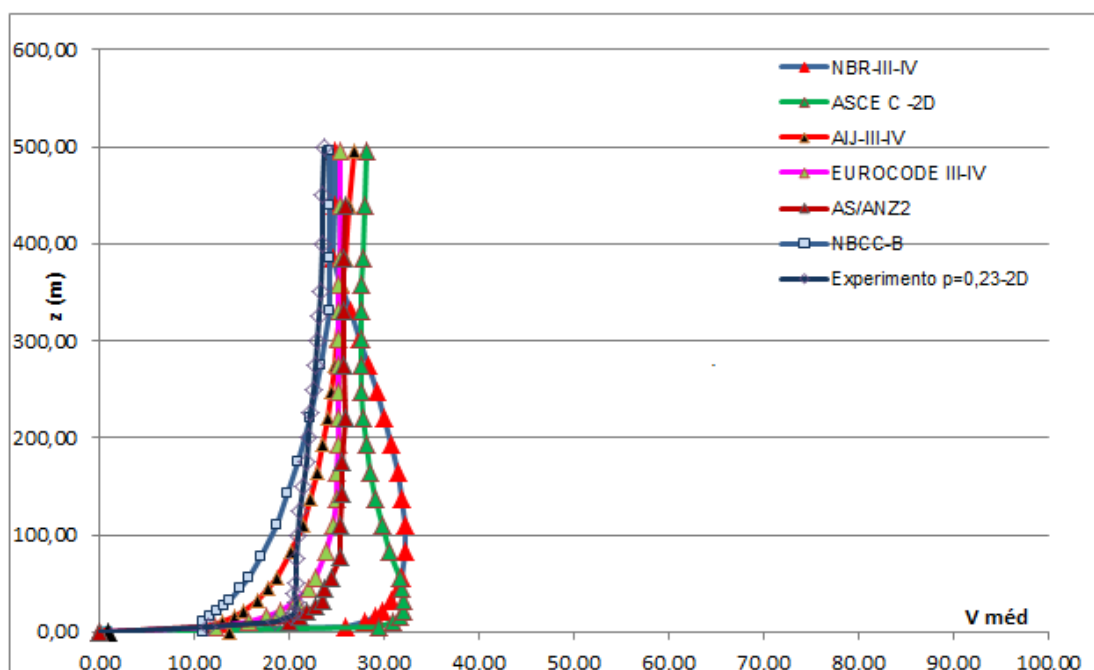
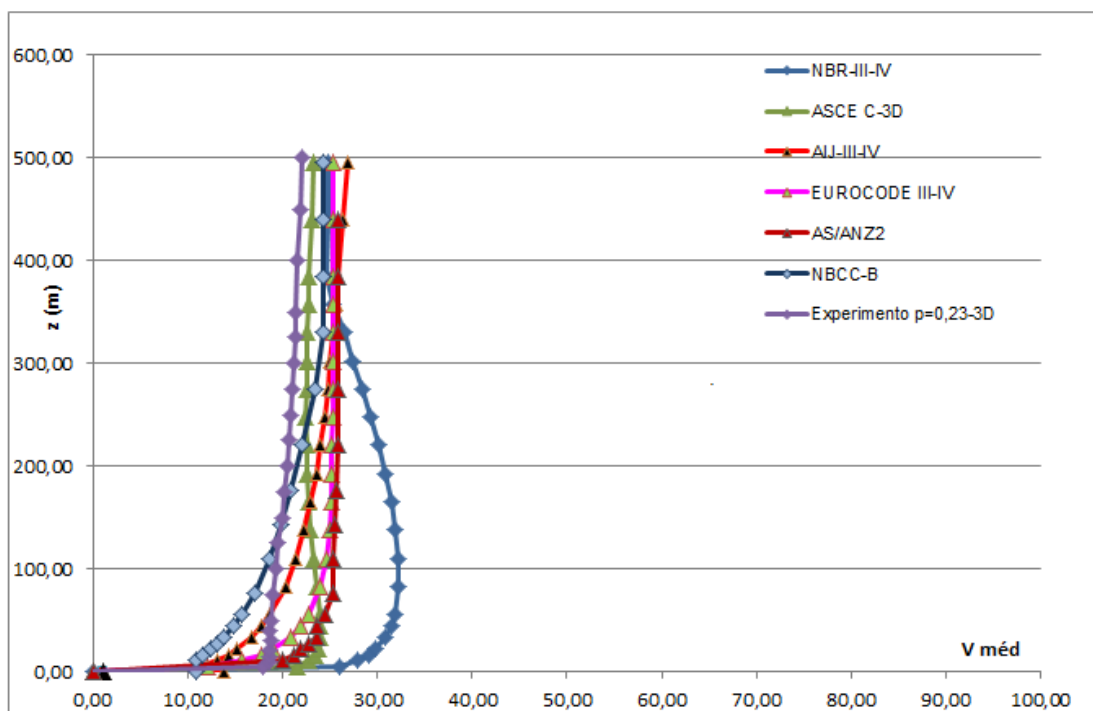


Figura 72 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 32° , morro simétrico, categorias III-IV, $p=0,23$ - 3D, sem normalização.



Cume Modelo C-inclinação 52°

Figura 73 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 52° , morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ - 2D, sem normalização.

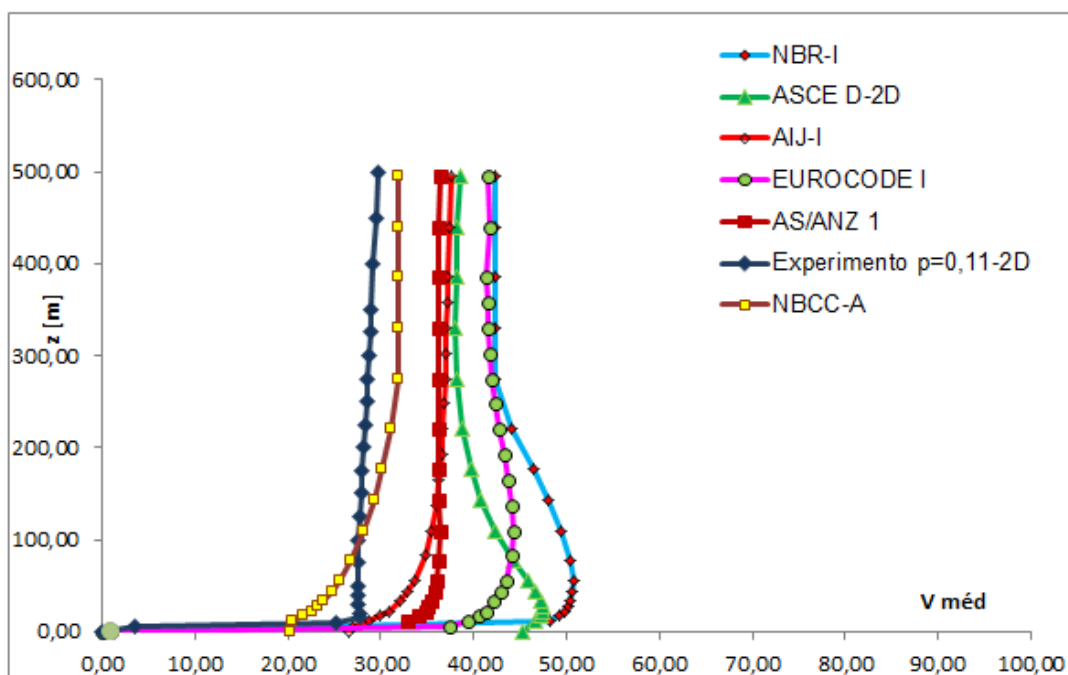


Figura 74 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 52°, morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ - 3D, sem normalização.

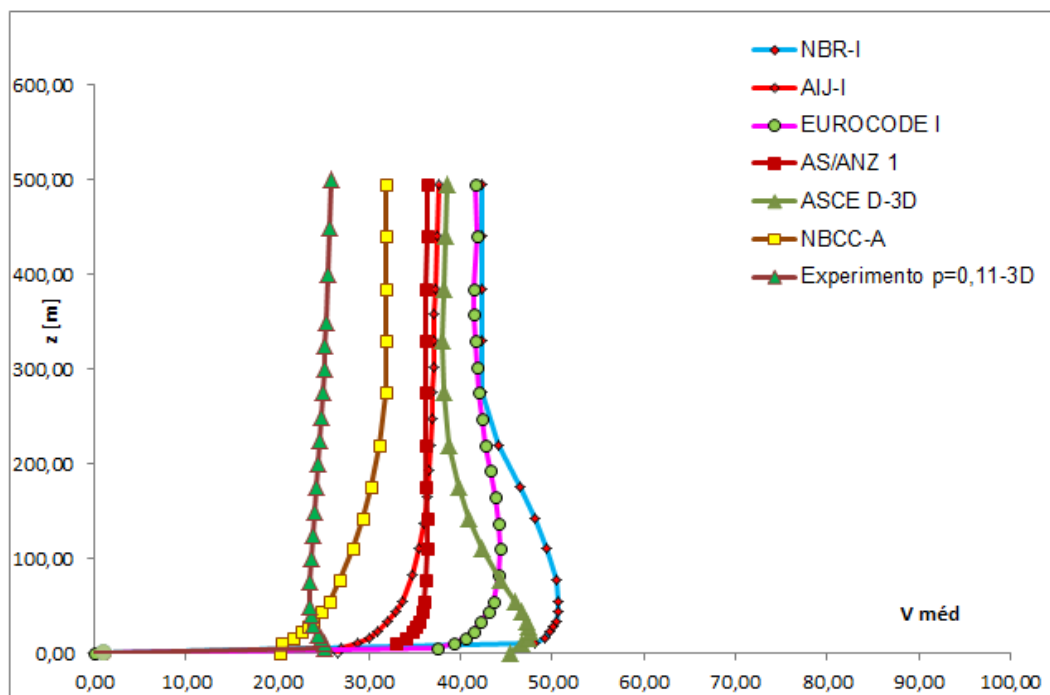


Figura 75 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 52°, morro simétrico, categorias III-IV, $p=0,23$, 2D, sem normalização.

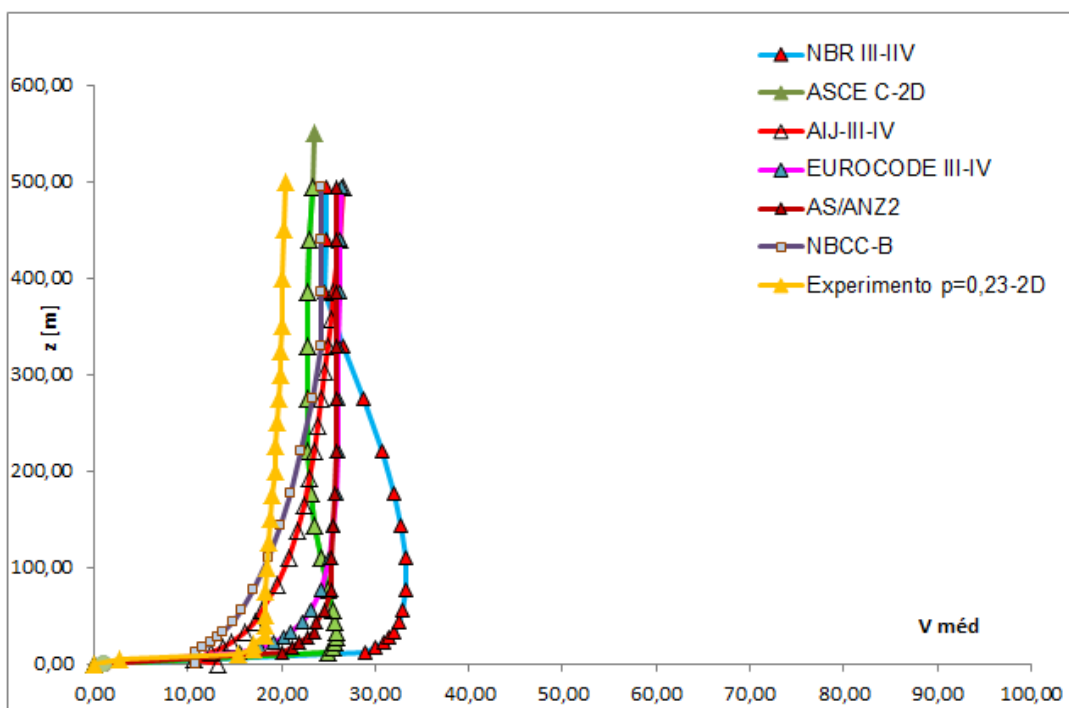
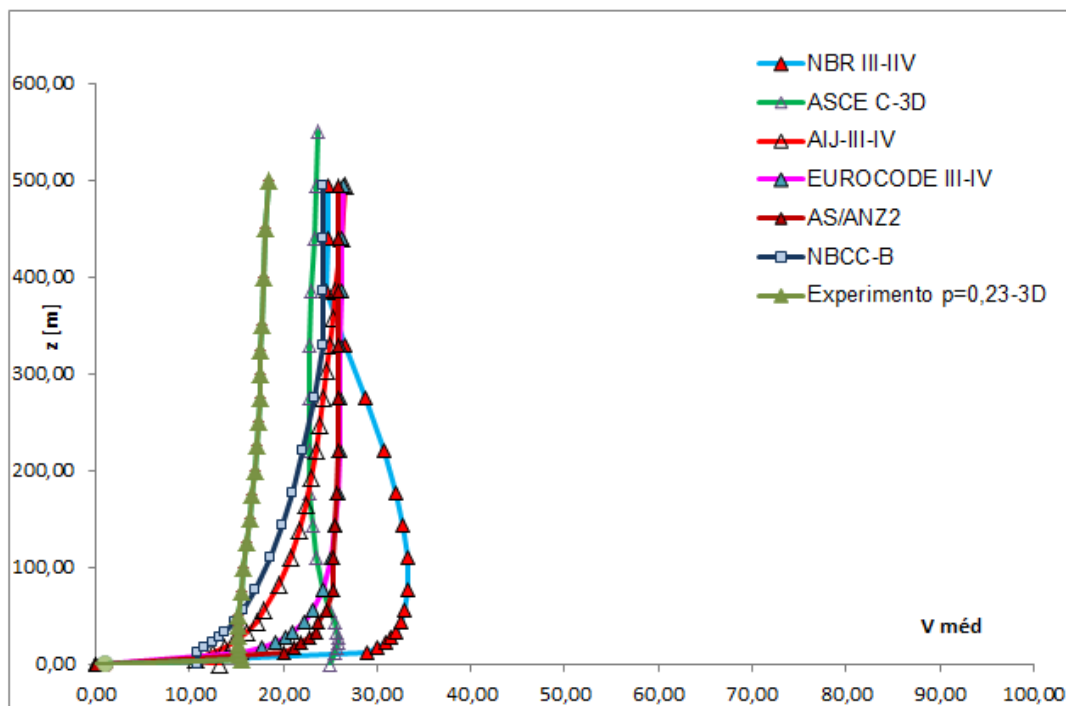


Figura 76 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 68° , morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ - 2D, sem normalização.



Cume Modelo D-inclinação 68°

Figura 77 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 68° , morro simétrico, categoria I, $p=0,11$ 3D, sem normalização.

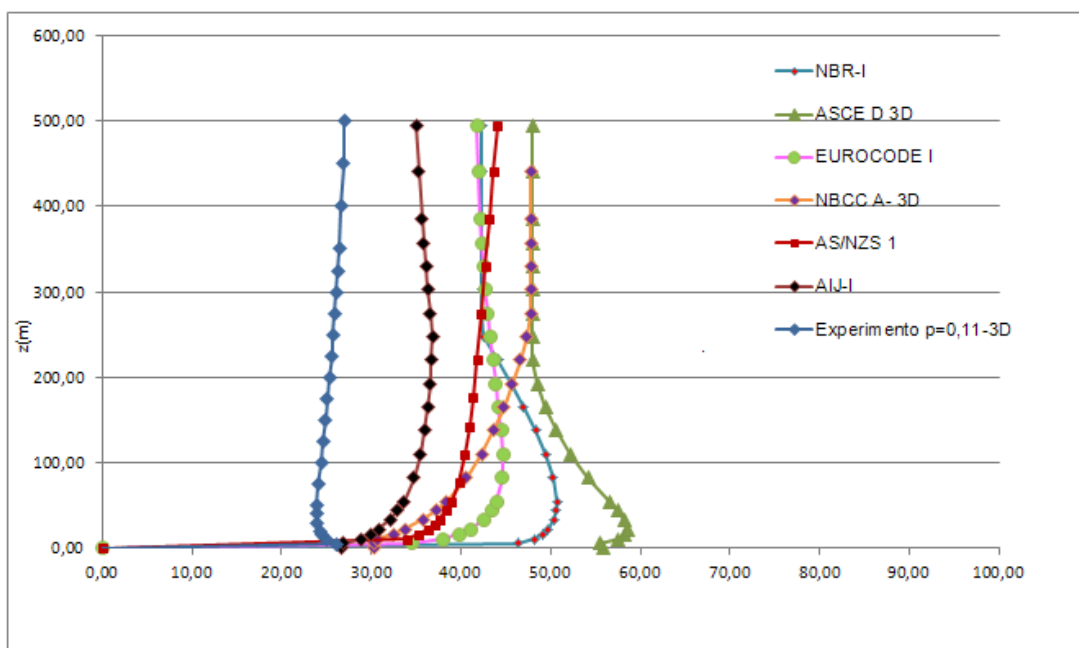


Figura 78 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 68° , morro simétrico, categorias III-IV, $p=0,23$, 2D, sem normalização.

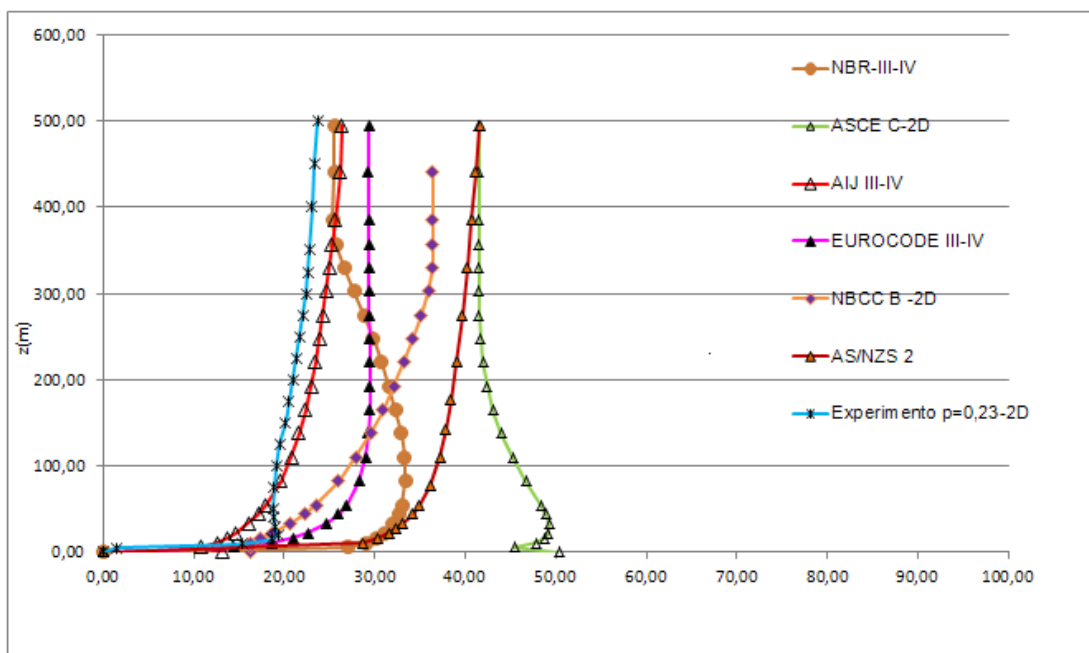
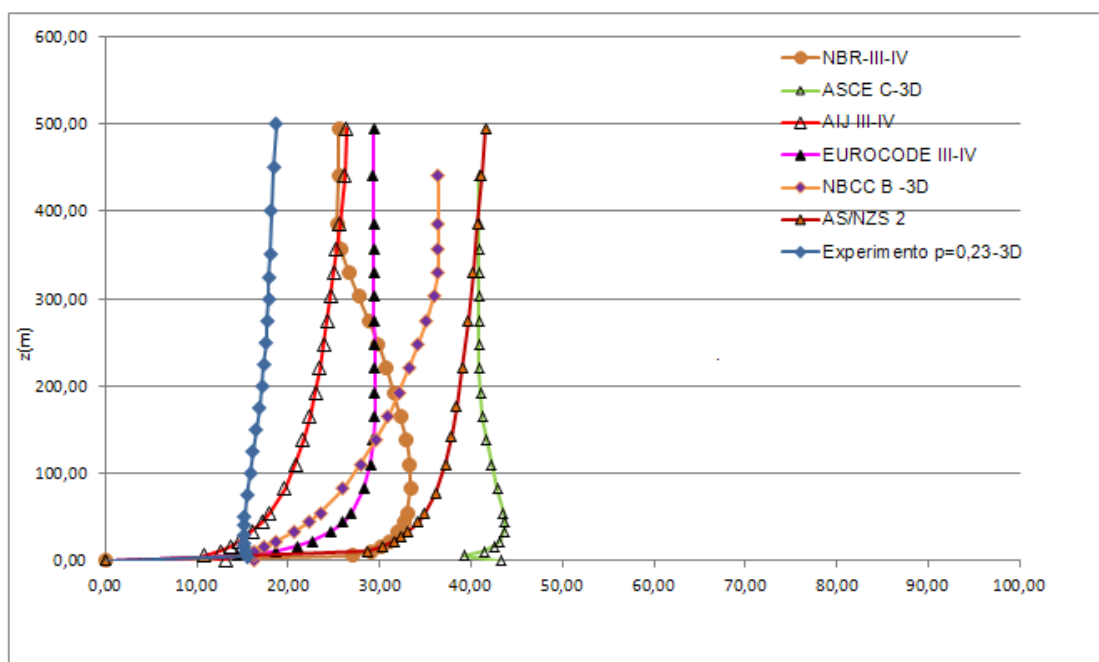


Figura 79 - Perfis medições experimentais e modelos analíticos para 68° , morro simétrico, categorias III-IV, $p=0,23$, 3D, sem normalização.



ANEXO E – Comparação entre medições experimentais para o cume dos modelos do Experimento I: Modelos Hipotéticos A, B, C e D - Morros isolados simétricos bi e tridimensionais

Figura 80 - Modelo A - Inclinação 25°.

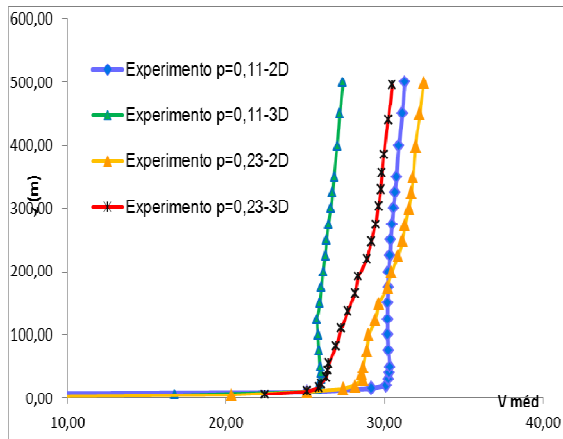


Figura 81 - Modelo B - Inclinação 32°.

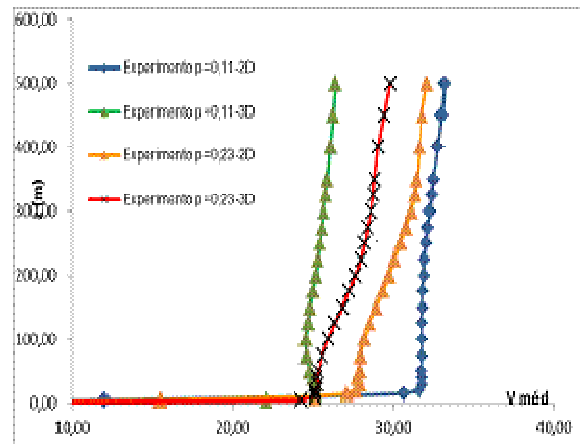


Figura 82 - Modelo C - Inclinação 52°.

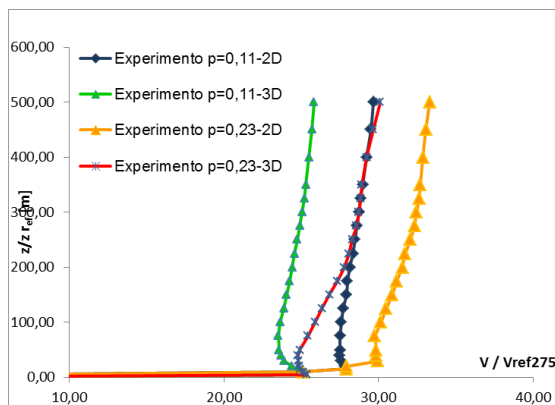


Figura 83 - Modelo D - Inclinação 68°.

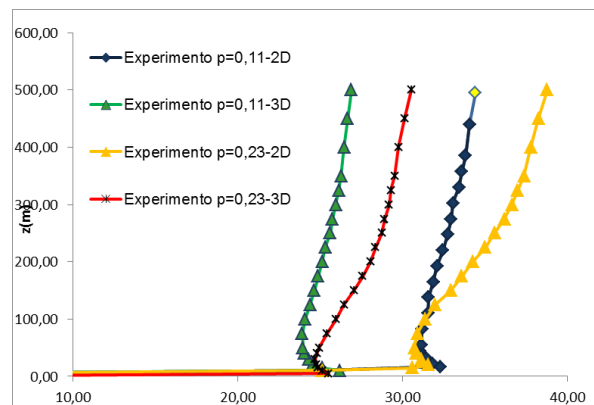
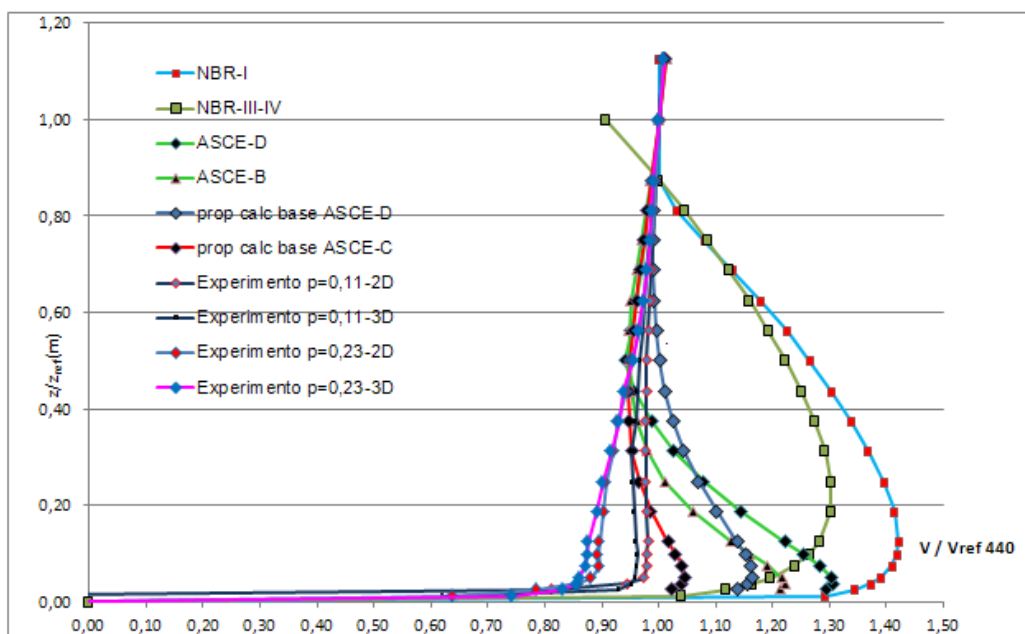


Figura 85- Medições experimentais, aplicação Modelos Analíticos e proposição multiplicador topográfico de aproximação ao perfil experimental para 25° com base ASCE - categoria D, $p=0,11$ e C, $p=0,23$, 2D e 3D.



Cume Modelo B

Figura 86 - Medições experimentais, aplicação modelo analítico NBR e proposição multiplicador topográfico de aproximação ao perfil experimental para 32°, com base NBR 6123 - categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D.

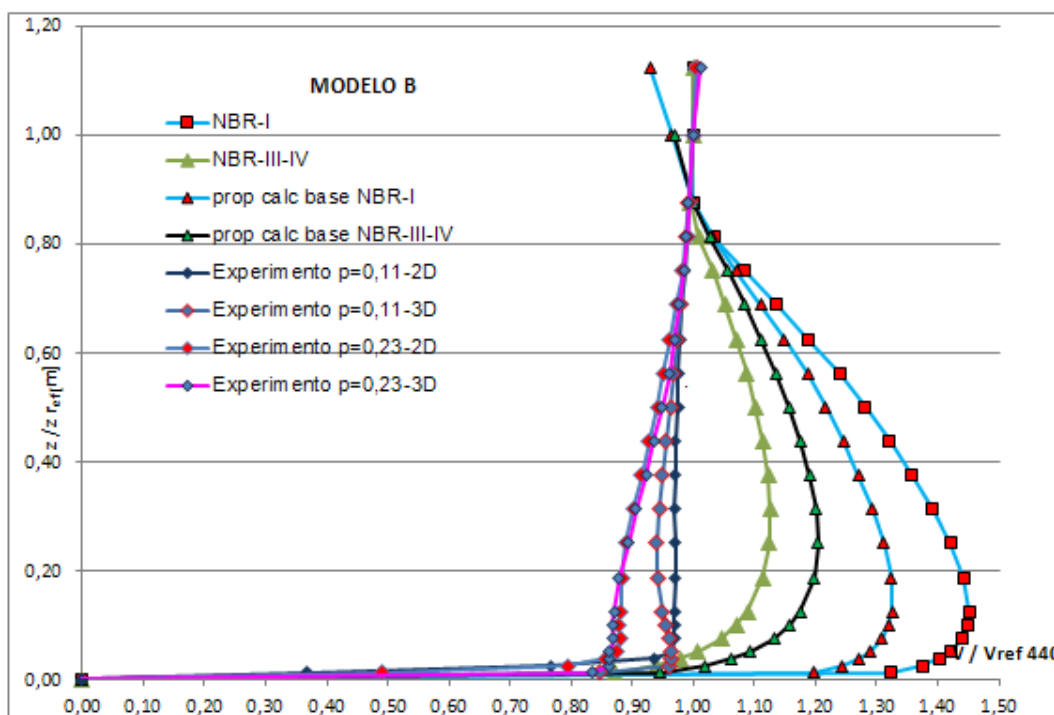
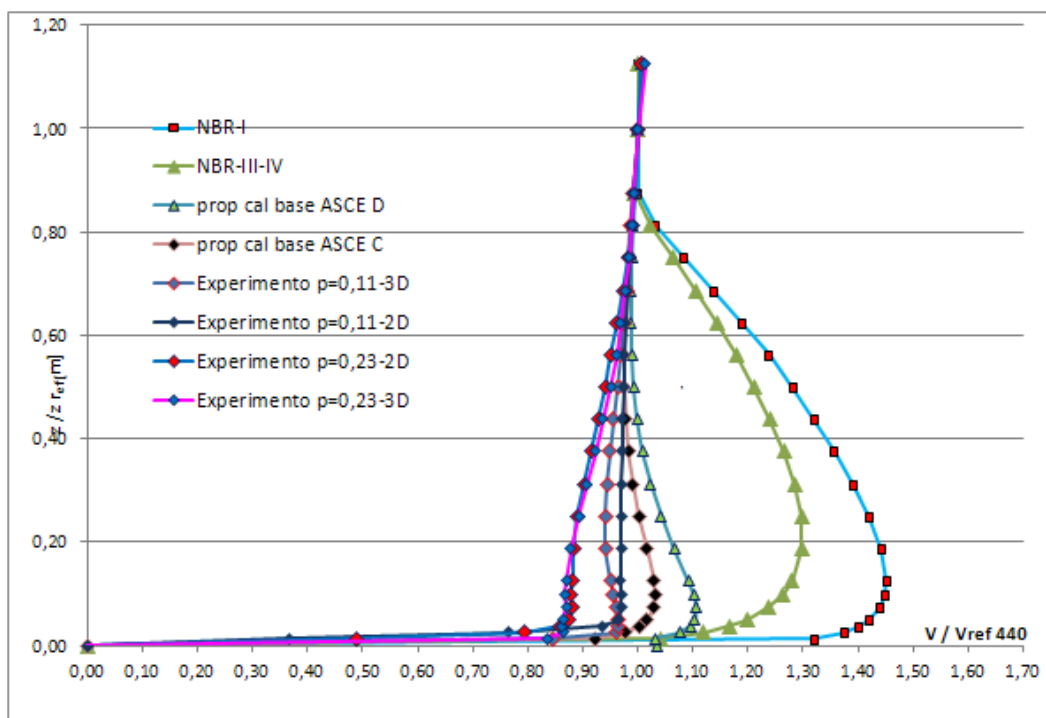


Figura 87 - Medições experimentais, aplicação modelos analíticos e proposição multiplicador topográfico de aproximação ao perfil experimental para 32° com base ASCE - categoria D, $p=0,11$ e C, $p=0,23$, 2D e 3D.



Cume Modelo C

Figura 88 - Medições experimentais, aplicação modelo analítico NBR e proposição multiplicador topográfico de aproximação ao perfil experimental para 52°, com base NBR 6123 - categorias I, $p=0,11$ e III-IV, $p=0,23$, 2D e 3D.

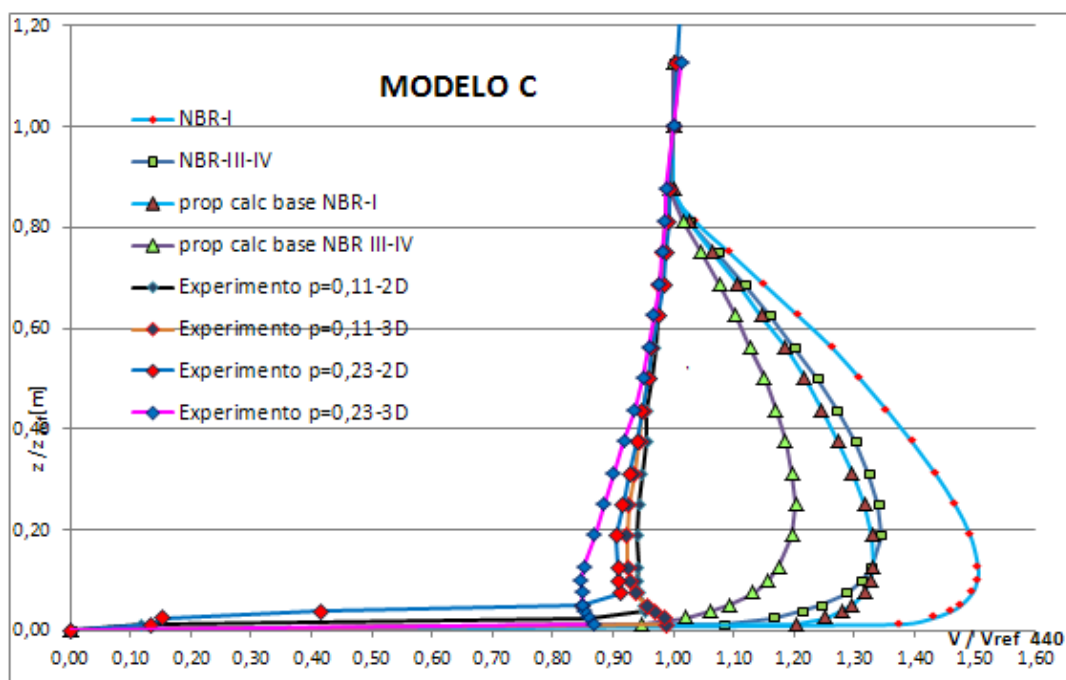
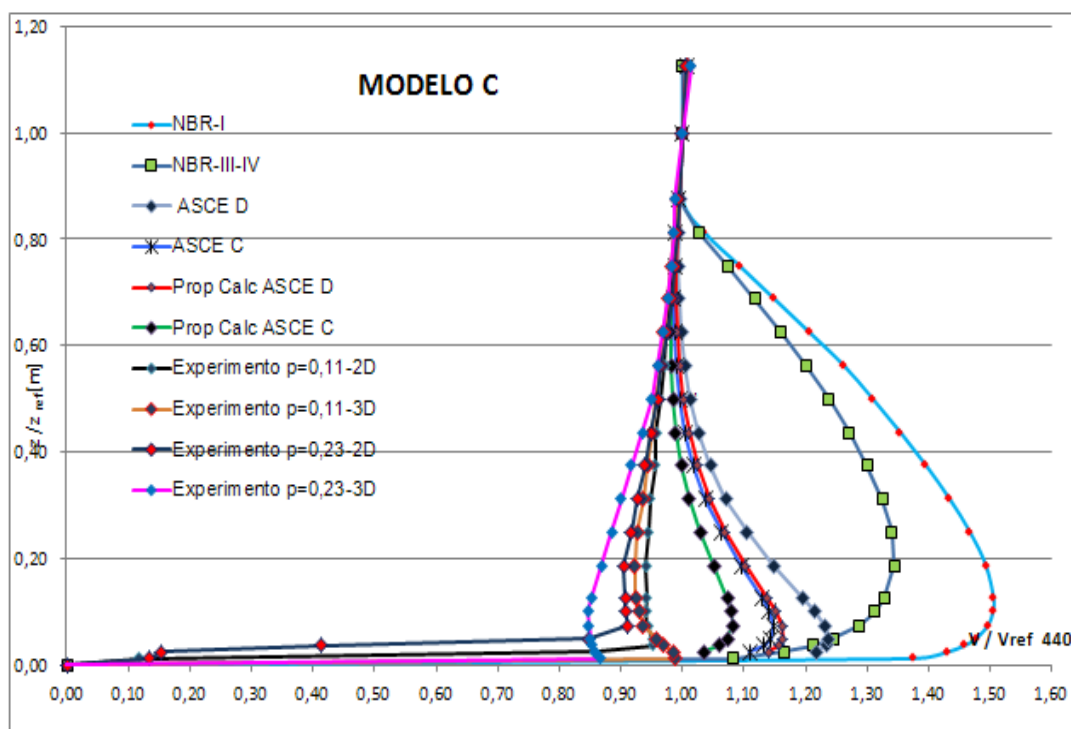


Figura 89 - Medições experimentais, aplicação modelos analíticos e proposição multiplicador topográfico de aproximação ao perfil experimental para 52° com base ASCE - categorias D, p=0,11 e C, p=0,23, 2D e 3D.



Cume Modelo D

Figura 90 - Medições Experimentais, aplicação modelo analítico NBR e proposição multiplicador topográfico de aproximação ao perfil experimental para 68°, com base NBR 6123 Categorias I, p=0,11 e III-IV, p=0,23, 2D e 3D.

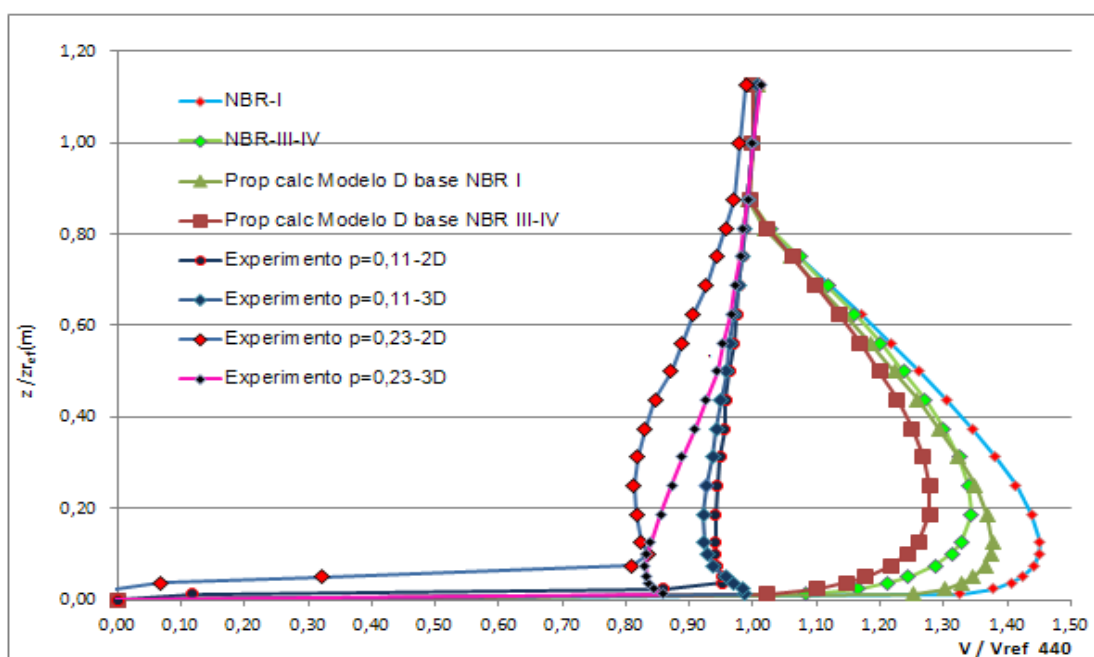


Figura 91 - Medições experimentais, aplicação modelos analíticos e proposição multiplicador topográfico de aproximação ao perfil experimental para 68° com base ASCE - Categorias D, $p=0,11$ e C, $p=0,23$, 2D e 3D

