

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

**ANÁLISE DA VELOCIDADE INCREMENTAL EM MORROS:
COMPARAÇÃO ENTRE PROCEDIMENTOS NORMATIVOS
E ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO**

Josiane Anderle Scotton

Porto Alegre

2016

JOSIANE ANDERLE SCOTTON

**ANÁLISE DA VELOCIDADE INCREMENTAL EM MORROS:
COMPARAÇÃO ENTRE PROCEDIMENTOS NORMATIVOS
E ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO**

Projeto de pesquisa apresentado ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Porto Alegre

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Scotton, Josiane Anderle

Análise da velocidade incremental em morros:
comparação entre procedimentos normativos e estudo
experimental em túnel de vento / Josiane Anderle
Scotton. -- 2016.

178 f.

Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2016.

1. velocidade incremental. 2. speed-up. 3.
morros. 4. NBR 6123. 5. perfil de velocidades. I.
Loredo-Souza, Acir Mércio, orient. II. Título.

JOSIANE ANDERLE SCOTTON

**ANÁLISE DA VELOCIDADE INCREMENTAL EM MORROS:
COMPARAÇÃO ENTRE PROCEDIMENTOS NORMATIVOS
E ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO**

Este projeto de pesquisa de mestrado foi julgado adequada como parte para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Estruturas, 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, 28 de março de 2016

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

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Ângela Borges Masuero (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Eng. Jussara Maria Leite Mattuella
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho a meus pais Beatriz (*in memoriam*) e Rudimar, a meu esposo Emerson Marodin por todo apoio e compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar.

Agradeço a meus pais Rudimar e Beatriz (*in memoriam*), minha irmã e meu esposo Emerson, por todo incentivo incondicional.

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho, pelos ensinamentos e todo apoio para realização da pesquisa.

Agradeço a equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC UFRGS.

Agradeço ao CAPES/CNPQ pela bolsa de estudos.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de
ficar parado.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

SCOTTON, J. A. Análise da Velocidade Incremental em Morros: comparação entre procedimentos normativos e estudo experimental em túnel de vento. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A formação do perfil de velocidades do vento é influenciada pela rugosidade e topografia do terreno; em um terreno plano, por exemplo, as velocidades são diminuídas conforme a sua proximidade com a superfície terrestre, determinando a constituição da camada limite atmosférica (C.L.A.). O escoamento do vento em terrenos complexos, ou seja, terrenos que possuem morros e taludes, sejam isolados ou múltiplos, possui o perfil de velocidades modificado, fazendo com que para cotas mais próximas da superfície se observe um aumento das velocidades. A este incremento de velocidades dá-se o nome de *speed-up*. Esta pesquisa tem como foco a investigação da estrutura do escoamento do vento, analisando minuciosamente o perfil de velocidades em um escoamento turbulento, para topografias isoladas e complexas. Para tanto, foram utilizados dois métodos para obtenção do perfil de velocidades: ensaios experimentais em túnel de vento e aplicação de normas e modelos analíticos de carregamento do vento. O plano experimental engloba nove topografias dentre as quais estão: quatro morros bidimensionais (2D) isolados, quatro morros tridimensionais (3D) isolados e um morro 3D de uma topografia complexa. Os modelos foram ensaiados para duas categorias de terreno, conforme a Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988): I – superfícies lisas de grandes dimensões e III-IV – terreno coberto por obstáculos, no túnel de vento Prof^o Joaquim Blessmann. Após a execução do plano experimental aplicou-se modelos analíticos com as mesmas parametrizações do modelo experimental e por fim foram comparados entre si. Os modelos analíticos estudados foram: Jackson e Hunt (1975, Lemelin, Surry e Davenport (1988) e as normas estudadas são: NBR 6123 (ABNT, 1988), Eurocode 1 (CEN-TC, 2010), AIJ (AIJ, 2004), NBCC (NRCC, 2010), AS/NZS (AS/NZS, 2011), ASCE (ASCE, 2010). O estudo comparativo entre os modelos analíticos e normas revela a inexistência de uma homogeneidade entre os modelos, visto que a formulação de cálculo é distinta, quando temos uma topografia em análise. Além disso, os modelos analíticos, quando comparados com os ensaios experimentais, tendem a ser mais conservadores tanto para modelos 2D ou 3D, para pontos à barlavento, no cume e à sotavento do morro. A NBR 6123 apresentou os maiores incrementos de velocidades em comparação com os demais modelos e com os dados experimentais.

Palavras-chave: *morros; perfil de velocidades; incremento de velocidade; NBR-6123.*

ABSTRACT

SCOTTON, J. A. Analysis of speed-up in hills: comparison between standards procedures and experimental study in wind tunnel. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The formation of the wind speed profile is influenced by the roughness and topography of the ground; on a flat ground, for example, the speeds are reduced according to their proximity to the earth's surface, determining the constitution of the atmospheric boundary layer (C.L.A.). The wind flow in complex terrain, in other words, whether single or multiples, has the modified wind speed profile, causing closest to the surface dimensions is observed increased speeds. To this increase speeds gives the name of speed-up. This research focuses on the investigation of the wind flow structure, thoroughly analyzing the speeds profile in turbulent flow, for isolated and complex topographies. For this purpose, two methods for obtaining the speed profile were used: experimental tests in a wind tunnel and application standards or wind loading codes. The experimental plan includes nine topographies among which are: four 2D hills (2D) isolates, four 3D hills (3D) isolates and a complex topography hill. The models were tested for two roughness according to the Brazilian standard NBR 6123 (ABNT, 1988): I – smooth surfaces large dimensions and III-IV – ground covered by obstacles, in the wind tunnel Prof^o Joaquim Blessmann. After the execution of the experimental tests were applied analytical models with the same parametrization of the experimental model and finally were compared. The analytical models studied were: Jackson e Hunt (1975, Lemelin, Surry e Davenport (1988), NBR 6123 (ABNT, 1988), Eurocode 1 (CEN-TC, 2010), AIJ (AIJ, 2004), NBCC (NRCC, 2010), AS/NZS (AS/NZS, 2011), ASCE (ASCE, 2010). The comparative study between the analytical models and standards reveals the lack of homogeneity between the models, since the calculation formulation is different when we have a topography analysis. Furthermore, analytical models, compared with the experimental tests tend to be more conservative for both 2D and 3D models, points to the windward, top of the hill and leeward. The NBR 6123 showed the largest increases in speed compared to the other models and experimental data.

Key-words: *hills; speed profile; speed-up; NBR-6123.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	29
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	30
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DO VENTO	32
2.1.1 Camada limite	32
2.1.2 Vento	33
2.1.3 Classificação do vento	34
2.1.4 Perfil de velocidades médias	36
2.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS EM TÚNEL DE VENTO	37
2.2.1 Estudos de modelos 2D	38
2.2.2 Estudos de modelos 3D	44
2.2.3 Estudos de parâmetros fundamentais	49
3 MODELOS ANALÍTICOS PARA EFEITOS DE TERRENOS COMPLEXOS .	51
3.1 INTRODUÇÃO SOBRE MODELOS ANALÍTICOS E NORMAS TÉCNICAS	51
3.2 NORMA BRASILEIRA: NBR 6123	52
3.2.1 Velocidade básica e característica do vento	53
3.2.2 Fator topográfico S_1	54
3.2.3 Fator de rugosidade S_2	56
3.2.3.1 Rugosidade do terreno	56
3.2.3.2 Dimensões da edificação	57
3.2.3.3 Altura sobre o terreno	57
3.2.4 Fator estatístico S_3	58
3.3 NORMA AMERICANA: ASCE 7-10: MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES	60
3.3.1 Velocidade básica do vento	60
3.3.2 Pressão de velocidades	60
3.3.3 Velocidade característica	61
3.3.4 Fator de exposição de pressão de velocidades	61
3.3.5 Fator de direcionalidade do vento	62
3.3.6 Fator de rugosidade do terreno	63
3.3.7 Fator de exposição	63

3.3.8 Fator topográfico	64
3.4 NORMA AUSTRALIANA/NEOZELANDESA: AS/NZS 1170.2	66
3.4.1 Velocidade regional do vento	66
3.4.2 Multiplicador de terreno/altura	67
3.4.3 Multiplicador de direcionalidade	68
3.4.4 Multiplicador de proteção	68
3.4.5 Multiplicador topográfico	70
3.5 NORMA CANADENSE: NBCC	72
3.5.1 Velocidade média do vento	73
3.5.2 Fator de exposição	73
3.5.3 Velocidade incremental do vento incidentes em morros e taludes	74
3.6 NORMA EUROPÉIA: EN 1991 – EUROCODE 1: ACTIONS ON STRUCTURES – CEN TC 250	76
3.6.1 Velocidade básica do vento	76
3.6.2 Velocidade média do vento	77
3.6.3 Fator de rugosidade do terreno	77
3.6.4 Fator topográfico	79
3.7 NORMA JAPONESA: ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN – AIJ: RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINGS	82
3.7.1 Velocidade básica e de projeto do vento	83
3.7.2 Fator de direcionalidade do vento	83
3.7.3 Fator do perfil de velocidades do vento	84
3.7.3.1 Fator de exposição para terrenos planos	84
3.7.3.2 Fator topográfico	85
3.8 MODELO ANALÍTICO: JACKSON E HUNT	87
3.9 MODELO ANALÍTICO: LEMELIN, SURRY E DAVENPORT	89
3.10 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS NORMAS	93
4 METODOLOGIA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TÚNEL DE VENTO	98
4.1 INTRODUÇÃO	98
4.2 TEORIA DA SEMELHANÇA	99
4.3 REPRODUÇÃO DA CAMADA LIMITE	101
4.4 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN	103
4.4.1 Simulação do vento natural	104
4.4.2 Aquisição de dados	106
4.5 MODELOS REDUZIDOS	106

4.5.1 Modelos reduzidos hipotéticos	107
4.5.2 Modelo reduzido de um morro real	110
5 RESULTADOS	113
5.1 TERRENO PLANO	113
5.2 MODELOS REDUZIDOS HIPOTÉTICOS	114
5.2.1 Ponto “A”: barlavento	114
5.2.2 Ponto “B”: centro	118
5.2.3 Ponto “C”: sotavento	122
5.2.4 Estudo comparativo entre modelos 2D e 3D	126
5.2.5 Estudo quantitativo dos modelos hipotéticos 2D e 3D	132
5.2.5.1 Variação percentual para o ponto “A”	133
5.2.5.2 Variação percentual para o ponto “B”	140
5.2.5.3 Variação percentual para o ponto “C”	148
5.3 MODELO REDUZIDO DE UM MORRO REAL	156
5.3.1 Morro sem mesa auxiliar	157
5.3.2 Morro com mesa auxiliar	158
5.3.3 Comparação do Morro com e sem mesa auxiliar	160
6 ANÁLISE DE RESULTADOS	164
6.1 TERRENO PLANO	164
6.2 MODELOS REDUZIDOS HIPOTÉTICOS	164
6.2.1 Ponto “A”: barlavento	165
6.2.2 Ponto “B”: centro	166
6.2.3 Ponto “C”: sotavento	168
6.3 MODELO REDUZIDO DE UM MORRO REAL	169
6.3.1 Morro sem mesa auxiliar	169
6.3.2 Morro com mesa auxiliar	169
6.3.3 Comparações	170
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	171
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	172
REFERÊNCIAS	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da formação da camada limite	33
Figura 2: Representação esquemática da circulação atmosférica	34
Figura 3: Perfil de velocidades para o vento sinótico	35
Figura 4: Perfil de velocidades para o vento não sinótico	35
Figura 5: Representação esquemática do perfil de velocidades médias pela influência de um morro	36
Figura 6: Perfil de velocidades para diferentes pontos a barlavento segundo estudo de Meroney et al	39
Figura 7: Representação esquemática da forma dos morros por Nørstrud	40
Figura 8: Morro isolado adotados por Kim et al	41
Figura 9: Morros múltiplos adotados por Kim et al	42
Figura 10: Morros sinusoidais e morros múltiplos adotados por Carpenter e Locke	43
Figura 11: Esquematização dos pontos de Separação e Reolamento do escoamento ...	50
Figura 12: Gráfico de isopletas da velocidade básica V_0 em m/s, para NBR 6123	54
Figura 13: Fator topográfico em morros, segundo a Norma Brasileira	55
Figura 14: Esquematização de morros para norma americana	64
Figura 15: Esquematização de morros para norma Australiana e Neozelandesa	71
Figura 16: Esquematização da zona de separação em cumes de morros para norma Australiana e Neozelandesa	71
Figura 17: Esquematização de morros para a norma Canadense	75
Figura 18: Esquematização para a velocidade incremental de uma topografia segundo a norma Européia	80
Figura 19: Esquematização para morro segundo a norma Japonesa	86
Figura 20: Esquematização para morro em forma de sino segundo Jackson e Hunt	89
Figura 21: Esquematização da velocidade incremental do vento em cumes e taludes segundo o modelo analítico de Lemelin Surry e Davenport	90
Figura 22: Esquematização dos parâmetros do modelo analítico de Lemelín, Surry e Davenport	91

Figura 23: Organograma do perfil de velocidades para as normas Brasileira, Americana, Australiana e Neozelandesa, Canadense, Européia e Japonesa	94
Figura 24: Esquema de dispositivos para formação da camada limite atmosférica	103
Figura 25: Esquema das mesas do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann	104
Figura 26: Perfil de velocidades médias normalizadas para vento com expoente da lei de potência expoente da lei de potência $p=0,11$ e $0,23$	105
Figura 27 Intensidade de turbulência local para vento com expoente da lei de potência expoente da lei de potência $p=0,11$ e $0,23$	106
Figura 28: Organograma da organização dos modelos reduzidos experimentais	107
Figura 29: Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 13°	108
Figura 30: Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 20°	108
Figura 31: Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 35°	109
Figura 32: Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 45°	109
Figura 33: Vista lateral do modelo reduzido hipotético 2D para ângulo 45°	110
Figura 34: Vista lateral do modelo reduzido hipotético 3D para ângulo 45°	110
Figura 35: Localização dos ângulos de incidência do vento adotados para o modelo reduzido real	110
Figura 36: Corte transversal do ângulo de incidência de 10° , dimensões em metros	111
Figura 37: Corte transversal do ângulo de incidência de 200° , dimensões em metros ...	111
Figura 38: Corte transversal do ângulo de incidência de 288° , dimensões em metros ...	111
Figura 39: Corte transversal do ângulo de incidência de 327° , dimensões em metros ...	112
Figura 40: Vista a barlavento do ângulo de incidência de 288° do modelo reduzido real	112
Figura 41: Vista a barlavento do ângulo de incidência de 288° com mesa auxiliar do modelo reduzido real	112
Figura 42: Perfil de velocidades normalizadas para terreno plano categoria II	113
Figura 43: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$	115
Figura 44: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$	116

Figura 45: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$	117
Figura 46: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$	118
Figura 47: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$	119
Figura 48: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$	120
Figura 49: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$	121
Figura 50: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$	122
Figura 51: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$	123
Figura 52: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$	124
Figura 53: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$	125
Figura 54: Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$	126
Figura 55: Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto A e $p=0,11$, para as normas Americana e Canadense	127
Figura 56: Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto B e $p=0,11$, para as normas Americana e Canadense	128
Figura 57: Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto C e $p=0,11$, para as normas Americana e Canadense	129
Figura 58: Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto A e $p=0,23$, para as normas Americana e Canadense	130
Figura 59: Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto B e $p=0,23$, para as normas Americana e Canadense	131
Figura 60: Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto C e $p=0,23$, para as normas Americana e Canadense	132
Figura 61: Perfil de velocidades normalizadas modelo sem mesa auxiliar, para o ponto A	157

Figura 62: Perfil de velocidades normalizadas modelo sem mesa auxiliar, para o ponto B	158
Figura 63: Perfil de velocidades normalizadas modelo com mesa auxiliar, para o ponto A	159
Figura 64: Perfil de velocidades normalizadas modelo com mesa auxiliar, para o ponto B	160
Figura 65: Perfil de velocidades normalizadas para o ponto “A”, comparação de perfis com e sem mesa auxiliar	161
Figura 66: Perfil de velocidades normalizadas para o ponto “B”, comparação de perfis com e sem mesa auxiliar	162
Figura 67: Perfil de velocidades normalizadas para modelo reduzido de morro real	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores meteorológicos para a Norma Brasileira	58
Tabela 2: Parâmetros α , Z_g e $Z_{mín}$ de acordo com a norma Americana	62
Tabela 3: Parâmetros μ e γ segundo a norma Americana	65
Tabela 4: Multiplicador de terreno/altura para regiões A/B/W e C/D, segundo a norma Australiana e Neozelandesa	67
Tabela 5: Comprimento de rugosidade para cada categoria de terreno, segundo a norma Australiana e Neozelandesa	68
Tabela 6: Multiplicador de proteção, segundo a norma Australiana e Neozelandesa	69
Tabela 7: Multiplicador de forma do morro, segundo a norma Australiana e Neozelandesa	72
Tabela 8: Parâmetros p^{**} e $\Delta V_{máx}$ segundo a norma Canadense	75
Tabela 9: Categorias de terrenos segundo a norma Europeia	79
Tabela 10: Parâmetros para determinação do fator de exposição segundo a norma Japonesa	85
Tabela 11: Parâmetros para determinação do fator topográfico para morros segundo a norma Japonesa	87
Tabela 12: Parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental de morros 3D e cumes /vales 2D para o modelo LSD	92
Tabela 13: Comparação entre o comprimento de rugosidade Z_0 das normas Brasileira, Americana, Australiana Neozelandesa, Canadense, Europeia e Japonesa	95
Tabela 14: Comparação entre abrangência de inclinações das normas Brasileira, Americana, Australiana Neozelandesa, Canadense, Europeia e Japonesa	96
Tabela 15: Comparação entre a área de abrangência horizontal	97
Tabela 16: Comparação entre valores máximos e mínimos da altura acima do terreno .	97
Tabela 17: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	133
Tabela 18: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	133

Tabela 19: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	134
Tabela 20: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	134
Tabela 21: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	135
Tabela 22: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	135
Tabela 23: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	136
Tabela 24: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	136
Tabela 25: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	137
Tabela 26: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	137
Tabela 27: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	138
Tabela 28: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	138
Tabela 29: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	139
Tabela 30: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	139
Tabela 31: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	140
Tabela 32: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	140
Tabela 33: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	141
Tabela 34: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	141
Tabela 35: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	142

Tabela 36: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	142
Tabela 37: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	143
Tabela 38: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	143
Tabela 39: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	144
Tabela 40: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	144
Tabela 41: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	145
Tabela 42: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	145
Tabela 43: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	146
Tabela 44: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	146
Tabela 45: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	147
Tabela 46: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	147
Tabela 47: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	148
Tabela 48: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	148
Tabela 49: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	149
Tabela 50: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	149
Tabela 51: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	150
Tabela 52: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	150

Tabela 53: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	151
Tabela 54: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	151
Tabela 55: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	152
Tabela 56: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	152
Tabela 57: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	153
Tabela 58: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	153
Tabela 59: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	154
Tabela 60: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$	154
Tabela 61: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	155
Tabela 62: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	155
Tabela 63: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	156
Tabela 64: Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$	156

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Valores mínimos do fator S_3	59
Quadro 2: Fator de direcionalidade K_D	63
Quadro 3: Categorias em função da condição do terreno	84
Quadro 4: Comparação entre as velocidades básicas	93
Quadro 5: Comparação entre categorias de exposição	94
Quadro 6: Comparação entre categorias de exposição por Kwon e Kareem	95

LISTA DE SIGLAS

ASCE – *American Society of Civil Engineering Standard*

AIJ – *Architectural Institute of Japan*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

2D – bidimensional

C.L.A. – Camada Limite Atmosférica

CEN-TC – Comité Européen de Normalisation – Technical Committee

CFD – *Computational Fluid Dynamic*

LSD – modelo analítico proposto por Lemelin, Surry e Davenport

NBCC – *National Building Code of Canada*

NRCC – *National Research Council of Canada*

NBR – Normatização Brasileira

AS/NZS – *Standards Australian Limited/ Standards New Zealand*

3D – tridimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

- A, B – parâmetros para a norma Europeia, dimensional
- b – parâmetro meteorológico conforme categoria e classe segundo a NBR 6123, adimensional
- b_s – largura média dos edifícios de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros
- B – distância horizontal entre o ponto mais alto da topografia até a metade de sua altura, para o modelo LSD
- C_{eZ} – coeficiente de exposição na altura em análise para a norma Canadense, adimensional
- C_e – fator de exposição, para a norma Canadense, adimensional
- C_e^* – fator de exposição modificado para emprego em morros e taludes, para a norma Canadense, adimensional
- C_g – coeficiente do efeito de rajada para o modelo LSD
- C_s – fator de época do ano, para a norma Europeia, adimensional
- C_p – fator de probabilidade para a norma Europeia, adimensional
- $C_{r(z)}$ – fator de rugosidade em função da altura para a norma Europeia, adimensional
- $C_{t(z)}$ – fator topográfico em função da altura para a norma Europeia, adimensional
- C_1, C_2, C_3 – parâmetros para determinação do fator topográfico, os quais dependem da inclinação do terreno para norma Japonesa, adimensional
- C_{em} – fator de exposição moderado para o modelo LSD
- d – altura do morro ou talude, ou diferença de nível entre o topo do morro ou talude até sua base, em metros
- E – elevação média do terreno acima do nível do mar para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros
- E_H – fator do perfil de velocidades do vento a uma altura d para norma Japonesa, adimensional

E_r – fator de exposição para terrenos planos para norma Japonesa, adimensional

F_r – fator de rajada, o qual é sempre correspondente à categoria II segundo a NBR 6123, adimensional

F_C – fator para implementação das incertezas adicionais na previsão das velocidades de vento nas regiões ciclônicas “C”, para a norma Australiana/Neozelandesa

F_D – fator para implementação das incertezas adicionais na previsão das velocidades de vento nas regiões ciclônicas “D”, para a norma Australiana/Neozelandesa

G – parâmetro para o modelo LSD, adimensional

h_s – altura média do telhado dos edifícios de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros

h – altura médio do telhado, acima do terreno, da estrutura protegida para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros

K_{zt} – fator topográfico para norma Americana, adimensional

K_z – fator de exposição de pressão de velocidades para norma Americana, adimensional

$K_D; M_D; S_d; C_D$ – fator de direcionalidade, adimensional

K_1 – considera a forma característica da topografia fica e máximo efeito de aumento de velocidade para norma Americana, adimensional

K_2 – considera a redução do incremento de velocidades com a distância à barlavento ou à sotavento da crista para norma Americana, adimensional

K_3 – considera a redução do incremento de velocidade com altura acima do terreno para norma Americana, adimensional

K – parâmetro de cálculo da máxima velocidade incremental do vento sobre morros para a norma Canadense, adimensional

K_f – parâmetro de forma para a norma Europeia, adimensional, valor recomendado $K_f = 0,2$

K_r – fator de terreno para norma Europeia, adimensional

K_{rW} – fator de conversão do período de recorrência para norma Japonesa, adimensional

L_h, L_u, L_s – distância à barlavento a partir da crista para onde a diferença de elevação do solo é metade da altura do morro ou talude, norma Americana, em metros

l_s – altura média do telhado dos edifícios de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros

L_1 – escala horizontal para determinar a variação vertical de M_h , sendo maior que $0,36 L_u$ ou $0,4 H$, para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros

L_2 – escala horizontal para determinar a variação horizontal de M_h , deve ser tomado como $4L_1$ a barlavento para todos tipos e a sotavento para morros e cumes, ou $10 L_1$ a sotavento para taludes, para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros

L_e – comprimento efetivo para a norma Europeia, em m

L_0 – distância horizontal entre o ponto mais alto da topografia até metade da altura, na direção ortogonal ao vento para o modelo LSD, em metros

L_m – comprimento do modelo

L_p – comprimento do protótipo

m – metros, corresponde ao sistema internacional de medidas, adimensional

m – vida útil em anos, para NBR 6123

$M_{Z,cat}$ – multiplicador do terreno/altura para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional

M_t – multiplicador topográfico para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional

M_s – multiplicador de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional

M_h – multiplicador de forma do morro para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional

M_{lee} – multiplicador do efeito de sotavento, pode ser utilizado 1,0 para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional

n – expoente para a norma Europeia, adimensional, valor recomendado $n = 0,5$

n_s – número de edifícios de proteção dentro de um setor de 45° com raio de 20 vezes h para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional

p – parâmetro meteorológico conforme categoria e classe segundo a NBR 6123, adimensional

P_m – probabilidade na vida útil de m anos para a NBR 6123

p^{**} – coeficiente de redução da velocidade incremental com a altura para a norma Canadense, adimensional

p – probabilidade para a norma Europeia, adimensional.

q_z – pressão de velocidades para norma Americana e para o modelo LSD, em N/m^2

S_1 – fator topográfico para a NBR 6123, adimensional

S_2 – fator de características do terreno e da edificação para a NBR 6123, adimensional

S_3 – fator de características do terreno e da edificação para a NBR 6123, adimensional

S – parâmetro de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional

St – fator de localização topográfica para a norma Europeia, adimensional

$u_0(L)$ – velocidade de referência quando $Z=L$, para o modelo de Jackson e Hunt

u^* – velocidade de atrito, a qual representa as condições de escoamento a barlavento para um terreno plano, para o modelo de Jackson e Hunt

V_0 – velocidade básica do vento para NBR 6123, Americana, Australiana/Neozelandesa, em m/s

V_k – velocidade característica do vento para NBR 6123, em m/s

V_0^+ – velocidade do vento com expoente da lei de potência probabilidade P_m , em m/s

$V_{sit,\beta}$ – velocidade local para a norma Australiana/Neozelandesa, em m/s

V_Z – velocidade na altura em análise para a norma Canadense, em m/s

\bar{V} – velocidade média para a norma Canadense, em m/s

$V_{b,10}$ – velocidade básica em função da direção e época do ano, medida a 10 m de altura e com uma média de 10 min em terreno aberto (categoria II), para a norma Europeia, em m/s;

$V_{b,f}$ – velocidade básica fundamental do vento, para a norma Europeia, em m/s;

V_m – velocidade média do vento na altura “z” para a norma Europeia, em m/s

V_{mf} – velocidade média do vento acima do terreno plano para a norma Europeia, em m/s

V_{AJI} – velocidade básica do vento para a norma Japonesa, em m/s

V_P – velocidade de projeto do vento para cada direção para a norma Japonesa, em m/s

V_m – velocidade do modelo

V_p – velocidade do protótipo

x – distância horizontal a partir da crista, em metros

X_i – distância à sotavento a partir de uma nova rugosidade para a posição na qual a altura desenvolvida é menor ou igual Z, para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

W – pressão induzida pelo vento, para o modelo LSD

z – cota acima do terreno, em metros

Z_g – altura nominal da camada limite atmosférica, em metros

Z_{\min} – altura mínima acima do terreno, em metros

Z_b – parâmetros para determinação de E_r para norma Japonesa, em metros

$Z_{0,r}$ – é a maior entre dois comprimentos de rugosidade entre fronteira tabela 11, para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros

Z_0 – comprimento de rugosidade, em metros

$Z_{0,II}$ – comprimento de rugosidade para terreno categoria II para a norma Europeia, em metros

α – expoente da lei logarítmica da velocidade de rajada em um tempo de 3s para a norma Americana, adimensional

$\Delta u_{(x,Z)}$ – perturbação para velocidade média ou velocidade incremental devido a presença de morros em um altura Z acima do terreno e uma distância horizontal x a partir da crista, para o modelo de Jackson e Hunt

$\Delta V_{\text{máx}}$ – velocidade incremental do vento para a norma Canadense, adimensional

ΔV – velocidade incremental para o modelo LSD

γ – fator de atenuação de altura para a norma Americana, em metros

κ – coeficiente de Von Kármán $\sim 0,4$

λ_L – fator de escala do comprimento

λ_f – fator de escala de frequência

λ_T – fator de escala de tempo

λ_V – fator de escala de velocidades

μ – fator de atenuação horizontal para norma Americana, adimensional

$\sigma_{(Z)}$ – função de forma, para o modelo de Jackson e Hunt

$\sigma_{u_{(x,Z)}}$ – função de forma do morro, a qual depende da altura e da posição de análise em relação a crista, não depende da inclinação do morro, modelo de Jackson e Hunt

θ – inclinação média do talude ou morro, em graus

1 INTRODUÇÃO

O vento, segundo uma visão macro-meteorológica, pode ser explicado como o movimento de massas de ar, as quais se originam de diferenças de pressão na atmosfera, causadas pelo aquecimento desigual da superfície atmosférica. Em consequência disto temos a ocorrência da circulação atmosférica (BÚRIGO, 2014).

A superfície atmosférica é a região da troposfera onde recebe a influência direta da superfície terrestre, entre 100 a 3000 m acima do solo os processos de transporte são modificados e assim é originada a camada limite atmosférica (C.L.A.). A influência da superfície terrestre gera forças de superfície com uma variação temporal de, aproximadamente, uma hora ou menos. Estas forças podem ser de diferentes origens, dentre as quais incluem as forças de atrito, transferência de calor, transpiração e evapotranspiração, emissão de poluentes e as diferentes topografias da superfície terrestre (STULL, 1988).

Para ventos de camada limite, as velocidades médias do vento tendem a aumentar proporcionalmente quanto maior for a altura considerada da superfície da terra. A superfície terrestre, por ser rugosa, tende a determinar um escoamento com característica turbulenta. Na C.L.A. encontram-se grandes gradientes de temperatura, umidade do ar e, principalmente velocidades, que ocorrem na atmosfera (MATTUELLA, 2012).

Em consequência desses gradientes de velocidade, na engenharia estrutural, o vento se torna um quesito primordial para se dimensionar adequadamente uma edificação e obras de arte. O perfil de velocidades do vento pode ser muito complexo e pode ser influenciado por diversos fatores, dentre os quais podemos citar: a condição climática e, principalmente, a complexidade do terreno. O vento ao deparar-se com diferentes tipos de terrenos, como por exemplo: terrenos muito rugosos, vales, taludes, morros, tende a modificar sensivelmente localmente o perfil de velocidades. Ocasionalmente assim, déficits ou incrementos em seu perfil de velocidades (MATTUELLA, 2012).

A complexidade do terreno é um tema que vem se tornando muito relevante na engenharia do vento. Porém, no âmbito de normativas e modelos analíticos, ainda existem muitas discrepâncias. Sendo cada vez mais necessários estudos para a homogeneização de normativas

e, principalmente, aprimorar o conhecimento para se ter um melhor entendimento de como a orografia influencia o escoamento do vento.

Assim, esta pesquisa limita-se a investigação dos fenômenos que são causados pelo escoamento da camada limite turbulenta, estavelmente neutra, em uma topografia complexa. A investigação é realizada através de ensaios de túnel de vento e análise de normas nacional e internacionais. Com os dados experimentais far-se-á um estudo comparativo com as normas: brasileira NBR-6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988; Canadense: National Building Code of Canada – NBCC (NRCC, 2010), Americana: *American Society of Civil Engineering Standard – ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE, 2010), Australiana e Neo Zelandesa: *Australian/New Zealand Standard AS/NZS 1170.2* (AS/NZS, 2011), Europeia: *European Standard: EUROCODE 1: Actions on Structures – CEN TC 250* (CEN, 2010), Japonesa: Architectural Institute of Japan – AIJ (AIJ, 2004). Além das normas serão analisados modelos analíticos Modelo de Jackson e Hunt (1975) e Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (LEMELIN; SURRY; DAVENPORT, 1988).

Segundo a NBR-6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), fator topográfico – S_1 é o termo que considera as variações do relevo do terreno. Este fator é considerado igual a um para terrenos planos ou fracamente acidentados e, também, para os pontos no sopé de morros e taludes. Entretanto, este valor difere de um para morros ou taludes com inclinações maiores que 3° . Sendo influenciado pela diferença de nível, a altura medida no ponto considerado, e a inclinação do morro ou talude.

Pesquisas recentes de Matuella (2012), sobre a influência de terrenos complexos no escoamento do vento, mostram que as normas acima citadas, em geral, superestimam os perfis de velocidade do vento quando comparados com os equivalentes perfis de resultados obtidos em túnel de vento, tanto para morros simétricos como assimétricos nas inclinações de 24° , 32° e 68° . A autora ainda salienta que os modelos analíticos não representam fielmente o efeito apresentado em ensaios experimentais em túnel de vento, mostrando-se em geral sempre maior que o experimental, para qualquer declividade seja 2D ou 3D. No que se refere a velocidade incremental, algumas normas não têm rotina de cálculo específica, como é o caso da NBR, o que leva, nestes casos a não representar fielmente o fenômeno.

Para o desenvolvimento desta pesquisa adotou-se a simbologia e terminologia recomendada pela NBR-6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). Em consoante, a norma apresenta algumas definições: morro é um terreno no qual a inclinação é suficientemente capaz de provocar a separação do escoamento. O cume do morro é o ponto localizado no ponto mais alto do morro, ou seja, maior altura desde o sopé até o maior ponto da elevação. Vale é uma depressão cuja altura é muito inferior as demais topografias adjacentes, como montanhas e morros. Este acidente geográfico tende a ter áreas de poucos quilômetros ou milhares de quilômetros quadrados, nos vales também podem ser encontrados rios.

A maioria das normas em vigência no mundo superestimam a velocidade incremental, como é o caso das normas supracitadas. Esse conservadorismo, quando em excesso, tem como consequência direta o maior consumo de materiais. Com isso, esse estudo visa analisar o quão grande é esse aumento, quando estão sendo analisados morros isolados em 2D e 3D.

1.1 REVELÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O estudo de topografias complexas é um tema vem se tornando cada vez mais importante para engenharia do vento. A topografia irregular é comumente encontrada no relevo brasileiro, principalmente, em serras e planaltos. Este tema é estudado desde a década de 40, porém com a inserção de energias mais sustentáveis através de parques eólicos, tornou-se muito relevante nos últimos anos.

As pesquisas contemplam simulações numéricas, simulações em túnel de vento e ensaios de campo. Existem diversas pesquisas sobre terrenos complexos, que em grande parte avaliaram orografias com morros e taludes isolados como se pode citar os estudos de Jackson e Hunt (1975), Kim et al. (1997), Ayotte e Hughes (2004) e Abdi e Bitsuamlak (2014).

Com o crescente avanço em pesquisas sobre esse assunto, no âmbito de normatização e modelos analíticos ainda se tem uma grande discrepância de resultados para o perfil de velocidades do vento. Nos estudos de Matuella (2012), a pesquisadora teve como enfoque principal a comparação entre diferentes normativas e modelos analíticos. Comparando somente os resultados dos ensaios de túnel de vento com expoente da lei de potência a previsão do perfil de velocidades proposto pela NBR-6123, pode-se observar que não há uma fiel representação da realidade segundo a previsão da norma citada.

Cabe ressaltar que estudos de proposição para nova formulação da NBR-6123, no que tange terrenos complexos, não foram publicados desde a vigência desta norma em 1988. Por isso, este estudo tem grande relevância para o aprimoramento dessa.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A presente pesquisa tem como foco principal a investigação dos perfis verticais de velocidade. O escoamento da camada limite é turbulento, neutramente estabilizado. Assim, os objetivos da pesquisa podem ser descritos:

- a) investigação da velocidade incremental do vento da componente horizontal, em terrenos de topografia complexa e modelos hipotéticos isolados 2D e 3D, por meio de modelos analíticos, normas e ensaios experimentais em túnel de vento;
- b) análise comparativa entre os dados obtidos em ensaios experimentais com os modelos analíticos anteriormente citados;
- c) revisão dos modelos analíticos com ênfase no fator topográfico, os quais são representados a seguir:
 - a) NBR-6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações (ABNT, 1988);
 - b) Americana: American Society of Civil Engineering Standard – ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE, 2010);
 - c) Australiana e Neo Zelandesa: Australian/New Zealand Standard AS/NZS 1170.2 (AS/NZS, 2011)
 - d) Canadense: National building Code of Canada – NBCC (NRCC, 2010);
 - e) Europeia: European Standard: EUROCODE 1: Actions on Structures – CEN TC 250 (CEN, 2010);
 - f) Japonesa: Architectural Institute of Japan – AIJ (AIJ, 2004);
 - g) Modelo de Jackson e Hunt (1975).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A pesquisa é dividida em 7 capítulos, sendo que o primeiro faz uma introdução do tema de pesquisa, justificativa do tema e objetivos da pesquisa. O capítulo 2 aborda uma breve revisão bibliográfica de camada limite atmosférica e conceitos de engenharia do vento, necessários para uma compreensão dos demais capítulos.

O capítulo 3 aborda os principais modelos analíticos e as principais normas vigentes no âmbito internacional. Neste capítulo são descritos os métodos de cálculo referentes à velocidade incremental devido a exposição em terrenos complexos.

O capítulo 4 descreve a técnica experimental dos ensaios em túnel de vento. Neste capítulo são descritos os métodos utilizados para a aquisição de dados, descrição dos modelos a serem ensaiados e demais detalhes vinculados aos ensaios.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos em túnel de vento e as comparações acerca das normas e modelos analíticos apresentados. Os resultados serão apresentados por pontos de análise.

No capítulo 6 são realizadas as discussões a despeito dos resultados apresentados no capítulo anterior. A análise, assim como nos resultados, será feita por pontos.

Para finalizar a dissertação o capítulo 7 remete a uma resenha sucinta da análise de resultados apresentados anteriormente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A camada limite atmosférica e os escoamentos em diversos tipos de terrenos possui grande relevância na Engenharia do Vento. Os problemas envolvendo terrenos complexos, no que tange a incidência de vento, são resolvidos com a investigação minuciosa da topografia e do comportamento do vento. Neste capítulo serão apresentados: alguns conceitos básicos de engenharia de vento e um breve histórico de estudos experimentais em terrenos complexos.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DO VENTO

Neste item serão abordados alguns conceitos básicos para o melhor entendimento dos próximos capítulos. Assim, será realizada uma pesquisa dos conceitos de engenharia do vento, dentre os quais podemos citar: camada limite, vento e suas classificações, perfis de velocidades médias do vento.

2.1.1 Camada Limite

A camada limite atmosférica (C.L.A.) é a região da troposfera que é diretamente afetada pela presença da superfície terrestre. A troposfera se estende a partir do solo até uma altitude média de 11 km, porém poucos quilômetros são diretamente afetados pela superfície terrestre. A influência da superfície na formação da camada limite atmosférica é por meio de forças superficiais. Dentre as quais, podemos citar: atrito, transferência de valor, emissão de poluentes, evaporação, transpiração e modificações do escoamento induzidas pela topografia do terreno (STULL, 1988).

A camada limite é subdividida em três regiões distintas: laminar, transição e turbulenta, conforme figura 1. Na camada limite laminar o escoamento é permanente, não havendo formação de redemoinhos. Já a região de transição o escoamento é mais instável, para um mesmo ponto a velocidade não é constante. Por fim, na região turbulenta as flutuações das velocidades são comumente observadas e acontecem em toda a espessura da camada limite. A região turbulenta da camada limite é a mais importante para aplicação da engenharia do vento. Visto que, grande parte das superfícies estão expostas ao escoamento da camada limite turbulenta (BLESSMANN, 2011).

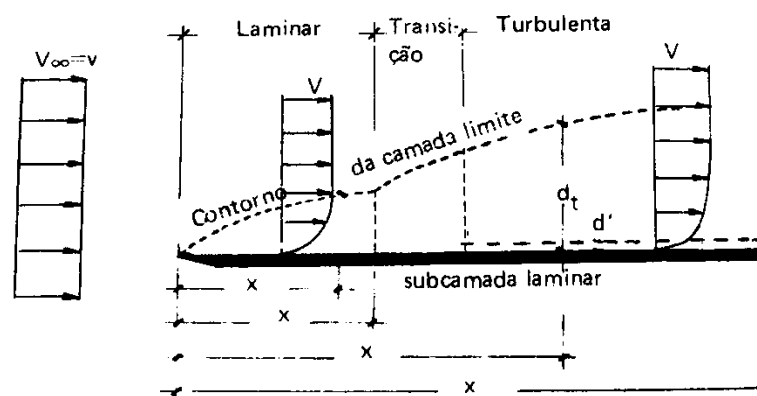


Figura 1 – Representação esquemática da formação da camada limite (fonte: BLESSMANN., 2011)

O comprimento “X”, como pode ser observado na figura 1, é o comprimento horizontal a partir da borda. Esse comprimento depende da massa específica do fluido “ ρ ”, da sua viscosidade “ μ ” e da velocidade do escoamento não perturbado “V”. Esses, por sua vez, formam o número de Reynolds que tem a seguinte formulação: $Re = V.X.\rho/\mu$ (BLESSMANN, 2011)

A espessura da camada limite depende da rugosidade do terreno e da distância a barlavento que o vento tem para percorrer o terreno. Esta espessura corresponde a altura gradiente (Z_g), cujo um valor típico para ventos fortes é 2500 m. O número de Reynolds associado a C.L.A. é suficientemente grande que pode ser considerado que o escoamento seja turbulento. “Para ventos fortes, com velocidades médias horárias superiores a 10 m/s, o escoamento é suficientemente turbulento para que a mistura produzida suprima os efeitos térmicos e a C.L.A. possa ser tratada como sendo adiabática e neutramente estável.” (LOREDO-SOUZA et al., 2004).

2.1.2 Vento

O vento, também denominado por movimento de massas de ar em relação à de superfície terrestre, é causado pelo aquecimento solar variável da atmosfera da terra. O processo de deslocamento de massas de ar é inicialmente provocado pelo gradiente de pressão, causado por fenômenos termodinâmicos e mecânicos, entre pontos de igual altitude. A energia necessária para o acontecimento destes fenômenos provém do calor irradiado pelo sol. Embora o sol seja o principal emissor de calor e assim, influencie no aquecimento terrestre, a superfície da terra também tem grande influência na atmosfera. A superfície terrestre, em geral, é transparente a irradiação solar, fazendo com que parte seja absorvida e outra parte refletida (SIMIU; SCANLAN, 1996).

A terra reflete cerca de 42% da energia solar incidente, os principais meios refletos dessa energia são geleiras e áreas cobertas por neve, além da atmosfera. Os 58% restantes de energia são absorvidos pela atmosfera através de, vapor de água, nuvens, ozônio, por partículas de aerossol e também pela crosta terrestre. A crosta ao ser aquecida irradia o calor em comprimento de ondas de aproximadamente 10 μm , muito maiores que o calor irradiado pelo sol. A absorção e irradiação da energia solar são influenciadas pelas características do meio que recebe as ondas de calor, como por exemplo, a absorção de energia é baixa para geleiras e alta para florestas. Essa desigualdade de absorção é responsável pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, sendo um dos fatores que influenciam a circulação atmosférica. Além desse, outros fatores também influenciam como por exemplo: a diferença de altitude e a rotação da terra sobre o movimento global da atmosfera (BLESSMANN, 2013).

A circulação atmosférica acontece quando há diferença de pressões entre as massas de ar. Basicamente a circulação terrestre, se movimenta de zonas mais frias para zonas mais quentes, conforme figura 2. A temperatura da atmosfera é denominada por alguns processos:

- a) radiação solar e terrestre;
- b) radiação na atmosfera;
- c) compressão e expansão do ar atmosférico;
- d) conduções moleculares;
- e) evaporação e condensação do vapor de água.

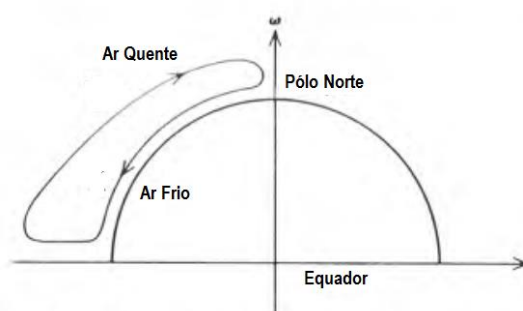


Figura 2 – Representação esquemática da circulação atmosférica (fonte: adaptado de SIMIU, SCANLAN., 1996)

2.1.3 Classificação do vento

Os ventos podem ser classificados em dois grandes grupos: os ventos sinóticos e os não-sinóticos. Os ventos sinóticos são aqueles que produzem um perfil vertical de velocidade média de camada limite (figura 3), que pode ser reproduzido por uma escala logarítmica ou

exponencial. “Geralmente, para o cálculo do carregamento do vento são considerados os efeitos de ventos sinóticos ou ciclones tropicais.”. Enquanto que os não-sinóticos possuem um perfil de velocidade diferenciado (figura 4). Geralmente para o cálculo de carregamento de vento em estruturas utiliza-se perfil de velocidades de vento sinóticos (DURAÑONA; STERLING; BAKER, 2007).

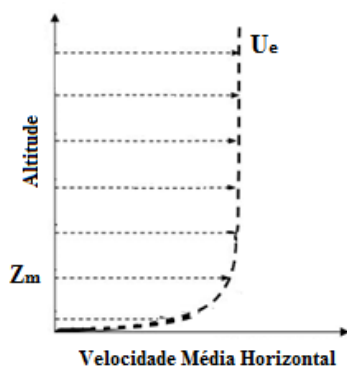


Figura 3 – Perfil de velocidades para o vento sinótico (fonte: LIN; SAVORY, 2006)

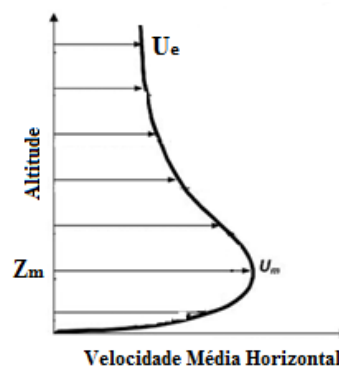


Figura 4 – Perfil de velocidades para o vento não sinótico (fonte: LIN; SAVORY, 2006)

Os ventos sinóticos podem ser classificados em dois grupos: tempestades extratropicais e ciclones tropicais. As tempestades extratropicais ocorrem em médias e altas latitudes, visto que seu vórtice não é tão bem definido quanto o de tempestades tropicais, por esta razão também são conhecidos como “ventos retos”. Os ciclones tropicais, também chamados de tufões no extremo oriente, ocorre em latitudes entre 5° e 20° . (SIMIU, 2011).

No início dos anos 2000, a ideia que todos os ventos possuíam características de ventos sinóticos acabou sendo repensada. Isto porque, até então pensava-se que os ventos extremos eram ventos sinóticos de grande escala e possuíam características da camada limite, muito semelhantes àquelas que são encontradas em túnel de vento. Porém, os ventos considerados não-sinóticos não têm seu perfil de velocidade reproduzidos como os sinóticos, estes por sua vez possuem perfil de velocidades aleatórios. Os ventos não sinóticos, geralmente, acontecem em pequenos intervalos de tempo e com velocidade muito altas, um exemplo deste tipo de vento são as tormentas elétricas (HOLMES, 2003). Com o intuito de entender o efeito da topografia no perfil de velocidades, este estudo contempla apenas ventos sinóticos. Assim, no item 2.2, deste capítulo, será abordada uma breve revisão da camada limite atmosférica em terrenos complexos para o melhor entendimento do perfil de velocidades.

2.1.4 Perfil de velocidades médias

As velocidades na superfície terrestre afetam diretamente a vida das pessoas, seja um usuário de uma edificação ou até mesmo um pedestre em via pública. Dependendo da situação e localização de uma estrutura, as velocidades podem variar bruscamente, tanto positivamente ou negativamente (STULL, 1988). As velocidades são largamente estudadas para os diferentes tipos de incidência do vento, estabilidade da camada limite, entre outros parâmetros que mudam constantemente as velocidades.

O perfil de velocidades é a composição das velocidades em diferentes alturas acima do solo, porém como há uma flutuação de velocidades ao longo da altura opta-se por um perfil de velocidades médio. O perfil de velocidades médio, para ventos sinóticos, é aproximado pela lei logarítmica. Essa lei “foi, originalmente, derivada para camada limite turbulenta sobre uma placa plana por Prandtl, no entanto, foi considerada válida numa forma não modificada em condições de vento forte na camada limite atmosférica perto a superfície.”(STULL, 1988).

Embora, matematicamente, a lei logarítmica seja a mais adequada e a que mais represente a teoria, o perfil de velocidades, na prática, é bastante influenciado pelas condições de contorno. O tipo de terreno, a rugosidade e o atrito são fatores importantes para o cálculo do perfil de velocidades (STULL, 1988). Outro fator que modifica, substancialmente, o perfil de velocidades é a topografia do terreno. Com essa influência o perfil de velocidades, quando calculado no topo de morro ou talude, aumenta suas velocidades em alturas próximas a superfície do terreno, conforme figura 5. Assim o efeito topográfico é de fundamental importância para um cálculo correto do perfil de velocidades, visto que influencia no dimensionamento de estruturas.

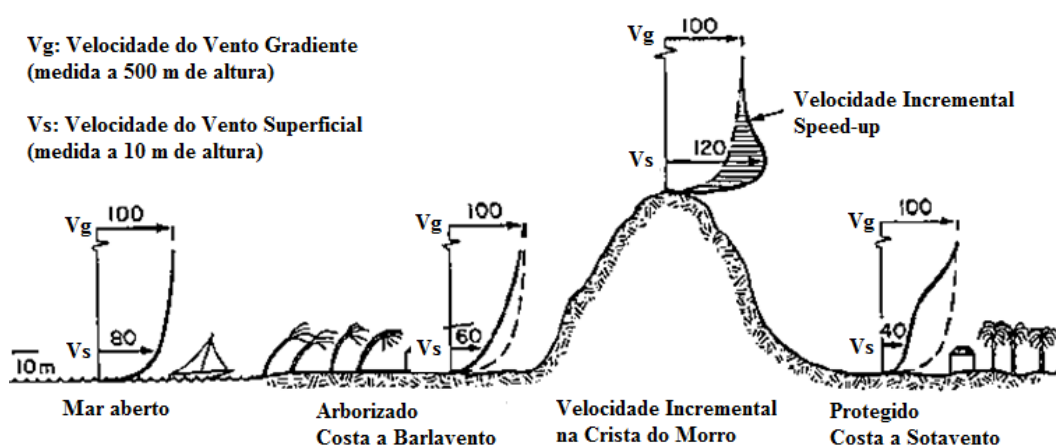


Figura 5 – Representação esquemática do perfil de velocidades médias pela influência de um morro.

A topografia além de causar a velocidade incremental no topo do morro, pode-se observar outros dois efeitos: separação e esteira. A separação do escoamento, acontece com morros de inclinações mais íngremes que terreno planos, onde o escoamento não é capaz superar os gradientes de pressão crescentes na direção do vento. Assim, a separação do escoamento pode ser visualizada a barlavento, no início do morro, a sotavento este efeito é observado após o cume do morro (STULL, 1988).

Quando a topografia é muito íngreme, por exemplo, acima de 30% de inclinação, o escoamento apresenta uma “bolha de separação”. Com isso, a inclinação da topografia passa a ter uma inclinação constante, independente da inclinação real do morro. Esse efeito de altas inclinações é frequentemente utilizado em normas, cujo principal objetivo é especificar um limite superior para os efeitos de aceleração devido à topografia (STULL, 1988).

A sotavento do ponto de separação, próximo a superfície do morro é observada a formação da esteira. Esse fenômeno é caracterizado pela existência de turbilhões de tamanhos e velocidades bastante variáveis, mas geralmente com velocidades menores que a do escoamento. Como a formação da esteira, geralmente, apresenta zonas de baixas pressões, conseqüentemente a esteira terá baixa pressão, ou seja, zonas de sucção (BLESSMANN, 2011).

2.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS EM TÚNEL DE VENTO

Os estudos da camada limite atmosférica em terrenos complexos iniciaram-se na década de 40, ocasião em que Queney publicou em 1948 uma revisão de modelos teóricos sobre escoamento não viscoso incidindo em montanhas e colinas. Em seguida, no ano de 1949, Scorer publicou soluções analíticas para escoamento à sotavento de morros (WOOD, 2000).

Segundo o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (RS, 2002), as diferentes propriedades da superfície, como geometria e altitude do terreno, rugosidade e distribuição de superfícies de terra e de água influenciam no perfil geral de vento, tanto na mesoescala como na microescala. Ao se realizar uma extrapolação geográfica de uma variável física complexa, como por exemplo o movimento aleatório da atmosfera, a principal consequência é o aumento da incerteza em níveis elevados. Devido à má distribuição e à falta de estações anemométricas, às incertezas se tornam inerentes ao processo de simulação. Para terrenos planos ou não-complexos e distantes das estações, a margem de incerteza é inferior a 10%, porém quando os terrenos são complexos e com declividades superiores a 30% o nível de incerteza passam a ser superiores a 10%.

Comparações entre diversos simuladores de camada limite como WASP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), NOABL (*Numerical Objective Analysis of Boundary Layer*) e WindMap, podem apresentar erros da ordem de 25% em terrenos complexos.

2.2.1 Estudos de modelos 2D

O estudo analítico de Counihan, Hunt e Jackson veio adicionar à pesquisa de Holton (1967) a variável da dupla dimensão do obstáculo, considerando a camada limite turbulenta. Além disso, estudaram a variação das oscilações da componente vertical do vento e das tensões de Reynolds para camada limites em túnel de vento. Nesse estudo, os autores salientam que a máxima redução da velocidade é proporcional a razão entre altura do obstáculo pela distância horizontal até o cume do morro. Para a componente vertical a proporção é a raiz quadrada da divisão entre distância horizontal até o cume do morro com a altura do obstáculo (COUNIHAN; HUNT; JACKSON, 1974).

No ano seguinte, os pesquisadores Jackson e Hunt apresentaram uma solução analítica para um escoamento sobre um obstáculo 2D de pequena altura isolado, como um pequeno morro isolado. O modelo analítico, embora seja apenas aplicado a morros isolados com pequena inclinação, é conciso e apresenta mudanças para as velocidades médias do vento e estrutura da turbulência nessas circunstâncias. Outra análise dos autores é segundo a razão entre a altura do morro e o comprimento característico do morro na direção do escoamento, se esta razão é muito menor que 1 é possível empregar as equações que regem o movimento dos fluidos. Como conclusões deste estudo, os pesquisadores apresentaram que os morros baixos e isolados interferem no escoamento do vento. Além disso, a velocidade e os esforços de corte eram proporcionais à forma, tamanho e rugosidade do objeto em questão (JACKSON; HUNT, 1975).

A forma do morro é um fator que modifica o perfil vertical de velocidades. Para avaliar esse efeito o estudo de Meroney et al. (1976) analisou duas formas distintas: sinusoidal (em forma de sino) e a triangular, ambas 2D. As inclinações analisadas foram 26°, 18°, 14° e 3°. Os modelos foram ensaiados em túnel de vento e analisados analiticamente, por fim os dados foram comparados com o modelo analítico de Jackson e Hunt (1975). Para tanto, os autores utilizaram um perfil de velocidades média pela lei de potência com coeficiente igual a 0,14. A rugosidade da superfície variou entre $3 \cdot 10^{-5}$ a $1,5 \cdot 10^{-4}$. Para morros íngremes a velocidade incremental diminui rapidamente com a altura. Para os autores existe um intervalo de inclinações otimizadas, que variam entre 14° a 18° e a melhor inclinação seria de aproximadamente 16°.

Para as inclinações analisadas não se pode afirmar que quanto maior a inclinação maior será a velocidade incremental. Os autores também analisaram pontos a barlavento do morro, onde as medidas foram realizadas na metade da altura do morro, no sopé do morro e a uma distância cerca 100 cm, a altura do morro é de 15 cm. Nesses pontos a barlavento os estudos mostram que no sopé do morro há uma redução das velocidades incrementais, e na metade da altura do morro já se tem velocidades incrementais maiores até chegar no topo do morro (figura 6) (MERONEY et al., 1976).

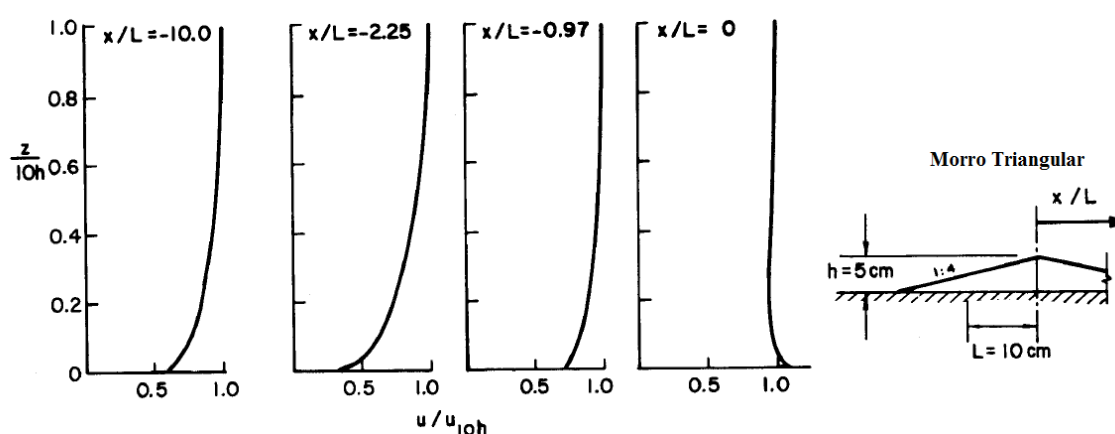


Figura 6 – Perfil de velocidades para diferentes pontos a barlavento segundo estudo de Meroney et al. (fonte: MERONEY et al., 1976).

Estudos experimentais são indispensáveis para um melhor entendimento do comportamento do escoamento, principalmente quando envolve morros, taludes ou terrenos de alta complexidade. Em 1977, Bowen e Lindley iniciaram estudos experimentais em túnel de vento, onde ensaiaram taludes 2D com uma camada limite neutramente estável. As declividades analisadas foram 4:1, 2:1, 1:1 e taludes verticais cujas análises da influência destes tipos de taludes foram referentes a velocidade e turbulência do escoamento. O estudo também fez medições de velocidade em 3 alturas distintas, 1 H, 4 H e 10 H além da referência, sendo H a altura do talude. Como principal resultado obtido, observou-se o acréscimo da velocidade do vento no topo do talude em 10%. Para a intensidade de turbulência houve também um aumento perto do topo do talude e quanto maior a altura das medições menor era a turbulência, sendo assim, influenciado pela velocidade de escoamento médio. Para as diferentes inclinações de taludes quanto maior a inclinação maior era a turbulência encontrada no topo do talude (BOWEN; LINDLEY, 1977).

Jensen em seu estudo analisou os perfis de vento sobre um talude 2D, as medições foram realizadas em campo em um trecho da Península de Riso durante os anos de 1974 e 1975. Com esses dados foi realizada uma comparação com a teoria de Jackson e Hunt (1975), e como

conclusão observou-se que esta teoria não é consistente na previsão de variações verticais da alteração do vento em taludes (JENSEN, 1983).

No estudo experimental de Britter, Hunt e Richards em túnel de vento foram analisados os efeitos do escoamento e a velocidade em um morro senoidal 2D com rugosidade superficial de $Z_0 = 0,02 h$ (onde h é a altura do morro) e inclinação máxima de 26%. Este estudo foi comparado com os estudos de modelo analítico de Taylor e Jackson, sendo constatado que há uma concordância entre os estudos experimentais e analíticos na região à barlavento do morro. Por outro lado, na região à sotavento do morro não houve concordância. Neste estudo os autores observaram que o aumento da velocidade do vento no topo do morro é diretamente influenciado pela rugosidade superficial e a pela inclinação (BRITTER; HUNT; RICHARDS, 1981).

Em 1982, Nørstrud simulou numericamente 5 tipos de topografia: elíptica, parabólica, triangular, cosseno quadrática e sinusoidal, na figura 7 pode-se observar algumas das formas estudadas. As formas acima descritas são 2D, de altura moderadamente baixa e onde não havia separação do escoamento. Embora, as geometrias acima fossem 2D a análise foi estendida para geometrias tridimensionais (3D). Em análise comparativa dos resultados de simulação experimental com os resultados que seriam obtidos através de estudos de Jackson e Hunt (1975), o autor adota um fator de amplificação que é a razão entre as velocidades local e calculada. Com isso, para uma razão entre altura por largura do morro de 0,1, a forma topográfica que obteve a maior amplificação foi a sinusoidal (NØRSTRUD, 1982).



Figura 7 – Representação esquemática da forma dos morros por Nørstrud (fonte: NØRSTRUD, 1982).

A comparação entre os dados de campo e os ensaios em túnel de vento, se tornaram grandes aliados na implementação de abordagens analíticas para resolução de problemas com terrenos complexos. Lemelin, Surry e Davenport (1988), contando com um banco de dados vasto, propuseram um método simplificado capaz de avaliar corretamente as velocidades de vento. Este método é chamado de abordagem LSD, proposto para um escoamento neutramente estratificado e para morros ou taludes, 2D ou 3D, para uma direção principal de vento. Como conclusão os autores salientam que o método é bastante eficaz, porém para terrenos muito complexos deve-se ter cautela, pois mesmo com um banco de dados vasto, sempre se tem incertezas em um método simplificado (LEMELIN; SURRY; DAVENPORT, 1988).

No final da década de 80 foi introduzido o conceito de razão de aspecto, que é a razão entre a metade do comprimento pela altura do morro, sendo analisado para morros 2D e baixos. Apesar de cada morro possuir uma razão de aspecto diferente, observa-se escoamentos diferentes conforme a razão de aspecto. A razão de aspecto não aumenta indefinidamente ela possui um valor ótimo. Nesse estudo, após a análise dos resultados, os autores observaram uma relação da velocidade incremental com a razão de aspecto, sendo esta uma relação inversamente proporcional (ARYA; CAPUANO; FAGEN, 1987).

Uma investigação experimental e numérica sobre o escoamento de vento em morros isolados e morros múltiplos 2D foi apresentada por Kim et al. em 1997. As figuras 8 e 9 apresentam croquis de morro isolado e morros múltiplos, e o comportamento de seus respectivos perfis de velocidades, quando o escoamento vem da esquerda para direita. Para as medições de velocidades de vento do modelo experimental utilizou-se um tubo de Pitot padrão e anemômetros de fio quente tipo X. Estes métodos de coleta de dados agregaram muitos conhecimentos para identificação das características do vento na região de recirculação à sotavento do morro. Já a modelagem numérica foi desenvolvida com base nos métodos dos elementos finitos com o algoritmo SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent) é um procedimento numérico comumente utilizado em Dinâmica de Fluidos Computacional para resolver as equações de Navier-Stokes. A teoria linear fornece uma previsão muito próxima, em comparação a modelos experimentais, dos incrementos de velocidade na parte do cume do morro com declive de 0,3 (KIM et al., 1997).

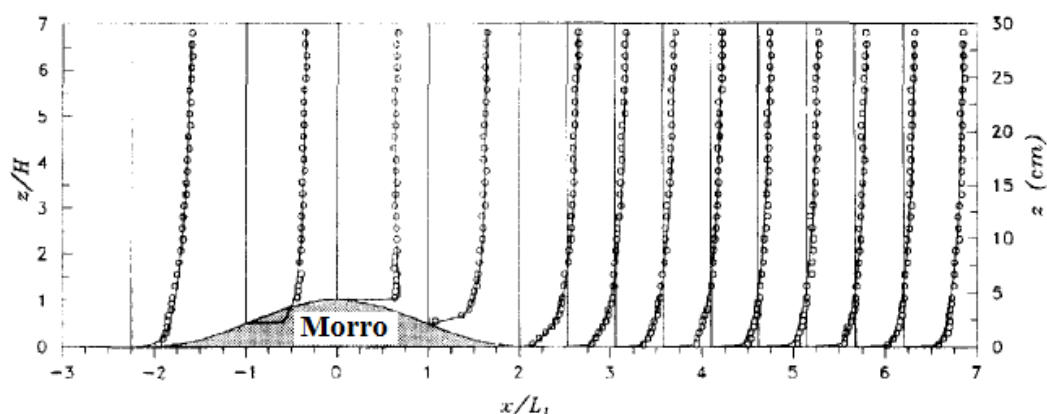


Figura 8 – Morro isolado adotados por Kim et al. (fonte: Kim et al., 1997).

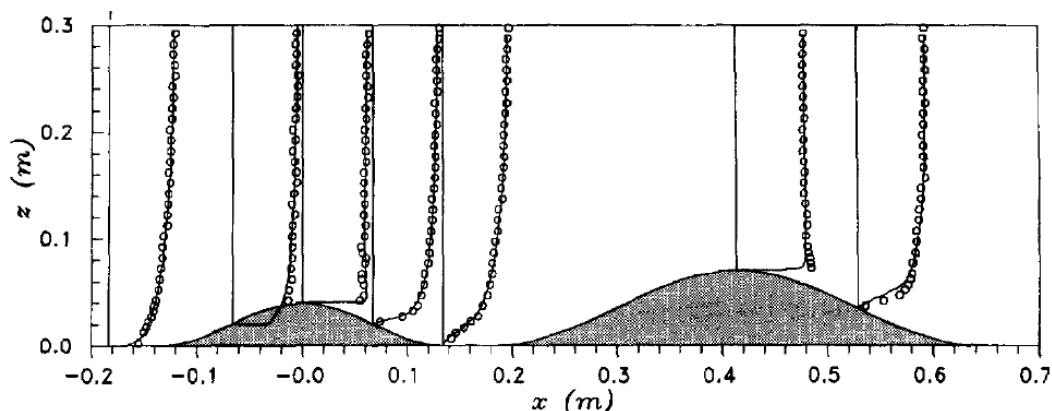


Figura 9 – Morros múltiplos adotados por Kim et al. (fonte: Kim et al., 1997).

Em meio a diversas normas de carregamento, as quais por muitas vezes calculam e avaliam de forma simplificada os efeitos da topografia na velocidade de vento de projeto, Miller e Davenport (1998), fazem algumas orientações sobre a resolução do problema. Segundo os autores, o estudo priorizou a influência de outros morros próximo ao analisado, foram analisadas topografias 2D. Como resultados e orientações, observou-se que a velocidade incremental em terrenos complexos é reduzido quando comparado com morros ou taludes isolados, o que muitas vezes acontece em normativas é o cálculo superestimando dos incrementos de velocidade (MILLER; DAVENPORT, 1998).

O estudo de morros múltiplos foi abordado também pelos pesquisadores Carpenter e Locke. Os autores fizeram uma investigação em túnel de vento de camada limite atmosférica, do escoamento de vento em diversos tipos de geometrias 2D, com escala de 1:1000. As medições de velocidade média foram analisadas em uma variedade de geometrias que incluiu: morro baixo sinusoidais, morros íngremes sinusoidais, morros múltiplos e um morro irregular, conforme figura 10. Os resultados obtidos observados revelam que para morros baixos isolados as velocidades eram mais altas em comparação com as outras geometrias analisadas, considerando uma altura de medida entre 10 a 100 m (alturas de interesse para aplicações de energia eólica). Entretanto, para morros sinusoidais múltiplos observou-se um maior fator de amplificação de velocidade média, cujo valor é 2,43, este valor foi medido em um morro íngreme isolado, a uma altura de 3 m a barlavento da crista. Para a configuração de morros múltiplos a velocidade média foi menor, se comparado com um morro isolado, onde a sotavento do primeiro morro há essa redução de velocidade média. Já para as velocidades de rajada nas cristas dos morros, observou-se pouca variação entre as diferentes configurações, com exceção

dos morros múltiplos, onde as velocidades de rajadas na crista do segundo morro apresentou altos valores (CARPENTER; LOCKE, 1999).

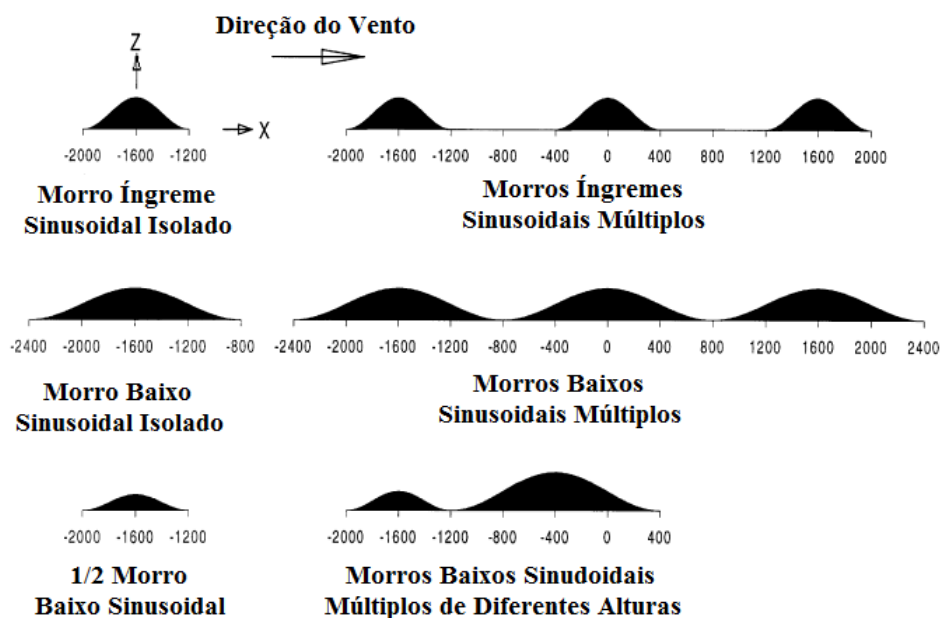


Figura 10 – Morros sinusoidais e morros múltiplos adotados por Carpenter e Locke (fonte: CARPENTER; LOCKE, 1999).

Nos estudos de Ayotte e Huges, em 2004, para coletar os dados foi utilizado o velocímetro *Laser Doppler* TSI 3D, cujo objetivo era carrear com mais precisão o perfil de velocidades. Os modelos reduzidos analisados foram de morros 2D sinusoidais isolados, onde eram variados rugosidade e declividade, estes foram ensaiados em túnel de vento de camada limite. Algumas observações importantes, explanadas pelos autores, remetem a ineficiência da teoria linear em prever o aumento de velocidade máxima na crista do morro, visto que pelas medições os valores são significativamente inferiores aos previstos (AYOTTE; HUGHES, 2004).

Cao e Tamura com o intuito de investigar o efeito da rugosidade em morros 2D, ensaiaram em túnel de vento de camada limite turbulenta dois modelos, um deles um morro 2D liso, que é a referência, e outro com rugosidade. A rugosidade foi implementada no modelo, através de pequenos blocos e com densidade de rugosidade de 4,1%. Além disso, para os perfis verticais de turbulência sobre um morro foi realizada uma comparação do morro com rugosidade e de uma superfície plana de mesma rugosidade, e também com um morro sem rugosidade. Para investigar a estrutura do escoamento a sotavento do morro os pesquisadores utilizaram sondas *Split-fiber*, as quais mediram a velocidade. A sotavento do morro é observado o fenômeno de separação do escoamento formando a chamada bolha de separação. Para investigar o

escoamento próximo ao solo, a fim de detectar o ponto de recolamento, utilizou-se medições mais refinadas. Como resultados, os pesquisadores observaram que o aumento na velocidade para um morro com rugosidade é maior que para um morro sem rugosidade. (CAO; TAMURA, 2006).

2.2.2 Estudos de modelos 3D

Em 1955, Scorer estudou a influência de montanhas e colinas na separação do escoamento de camada limite. Neste estudo ele demonstra que perto da superfície da montanha a velocidade do vento aumenta significativamente. Em consequência disto, o modo estacionário da camada de atrito é perturbado (SCORER, 1955).

Os estudos de campo são fundamentais tanto para validação de modelos analíticos quanto para a calibração de túneis de vento. Em 1979, os pesquisadores Mason e Sykes estudaram um morro baixo isolado e assimétrico, que neste caso foi o morro *Brent Knoll*. Este estudo teve *a priori* a análise 3D do morro baixo isolado e assimétrico com base analítica nos estudos dos pesquisadores Jackson e Hunt (MERONEY et al., 1975). Para este estudo os autores Mason e Sykes estenderam a base de 2D, de Jackson e Hunt, para 3D. Como resultados foi explanado que as trocas mais significativas de turbulência eram observadas na região da esteira a sotavento, onde é mais evidente as transferências de energia para altas frequências (MASON; SYKES, 1979).

Na década de 80 os estudos em túneis de vento se intensificaram, muitos pesquisadores analisaram de diversas formas os morros e taludes reais em modelos reduzidos. Em algumas pesquisas, foram realizadas comparações com soluções analíticas e até mesmo com dados de campo existentes. Menorey em 1980, realizou um vasto estudo de campo e comparou com dados experimentais a região de *Rakaia River Gorge*, este estudo contemplou medidas de velocidade e direção do vento. Como principal resultado o autor aborda a capacidade de reprodutibilidade do modelo reduzido em comparação com os dados de campo (MERONEY, 1980).

Outro estudo experimental foi proposto por Neal, Stevenson e Lindley, este por sua vez, contemplou um modelo reduzido de *Gebbies Pass*. Utilizou-se três tipos de modelo reduzido, o primeiro somente um morro isolado, o segundo com a extensão da topografia e por fim foi adicionada a rugosidade do terreno. Foram observados o perfil de turbulência e velocidade, este estudo foi comparado com ensaios de campo. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram

que as velocidades tiveram um aumento significativo, entre 50 a 80%, principalmente, no cume do morro em análise. Outra conclusão observada é que as formas de construção dos modelos reduzidos também tiveram influência no perfil de velocidades. A forma de construção que apresentou-se mais diferentes das demais foi a forma de morro isolado (NEAL; STEVENSON; LINDLEY, 1981).

Além destas pesquisas de campo, outros pesquisadores modelaram morros como por exemplo: a *Black Mountain* (BRADLEY, 1980), *Rocky Mountains* (TEUNISSEN, 1983), *South Wales* (MASON; KING, 1984), *Rietholzbach* (KUSTAS; BRUTSAERT, 1986), *Kettles Hill* (TAYLOR; MASON; BRADLEY, 1987), *Askervein* (TAYLOR; TEUNISSEN, 1987), *Kettles Hill* (SALMON et al., 1988). Essas pesquisas foram analisadas tridimensionalmente com morros baixos e moderadamente inclinados, muitas delas confirmam o estudo analítico feito por Jackson e Hunt (MERONEY, 1975), além de incrementar evoluções nesta área de pesquisa.

Teunissen (1983), realizou um estudo em túnel de vento de um morro 3D localizado no sopé de montanhas rochosas no oeste do Canadá. Sendo este, parte de um estudo que contempla modelagem numérica, ensaios experimentais em túnel de vento e medições em campo. Estas duas últimas, foram realizadas no topo do Morro *Kettles* com 10 torres de 10 metros de altura. Os dados obtidos, em túnel de vento localizados à barlavento, no cume e à sotavento, da velocidade incremental ΔV são comparados com os dados coletados em campo. Como resultado se obteve, na maioria dos dados, uma boa acurácia entre os dados obtidos no modelo do túnel e os dados coletados em campo, porém percebeu-se uma tendência de superestimação do modelo do túnel em comparação com os dados de campo. Segundo o autor, a metodologia apresentada por Jackson e Hunt (1975) para a estimativa do fator máximo da velocidade incremental do vento, determina analiticamente valores superestimados (TEUNISSEN, 1983).

Na mesma linha de pesquisa de Teunissen, Hertig em 1988 modelou em túnel de vento uma região dos Alpes Suíços, para observar a variação do perfil de velocidades. Além disto, foram adquiridos dados em campo para fazer a comparação com o ensaio de túnel de vento. Como consequência observou-se que o ensaio de túnel de vento reproduz, em grande parte, as medições de campo, considerando a influência da orografia local (HERTIG, 1988).

Miller analisou o comportamento do escoamento em camada limite turbulenta em terrenos complexos, para isso foi utilizado método experimental em túnel de vento e o método numérico. No estudo experimental foram realizadas medições de velocidade horizontal do vento e das

tensões de Reynolds em morros sinusoidais – em forma de sino. Os resultados dos ensaios experimentais foram utilizados para validar o modelo linear numérico, para escoamento camada limite turbulenta. Um dos principais objetivos do estudo é a observação acerca da velocidade incremental do vento no cume de morros. Um dos principais resultados obtidos é sobre o perfil de velocidade média de uma determinada área, o qual segue um perfil logarítmico apenas em alturas acima da superfície dos cumes dos morros (MILLER, 1996).

Além de Desiato et al. (1998), Ishirara, Hibi e Oikawa em 1999 mediram a velocidade do vento em três direções. Neste estudo, os autores analisaram o escoamento 3D médio em um modelo de um morro 3D com inclinação máxima 32°. As medições foram adquiridas com sondas de fio-quente, com o intuito de detalhar melhor a turbulência. Uma das mais importantes observações do estudo é que a velocidade incremental não ocorre apenas no cume do morro, esta ocorre também nos pontos adjacentes ao cume. Além disso, os pesquisadores observaram que a sotavento do morro há o fenômeno da separação do escoamento. Quanto as máximas perturbações observadas no perfil de velocidades vertical, elas foram observadas a uma relação $z/h = 1$ (ISHIHARA; HIBI; OIKAWA, 1999).

Derickson e Peterka (2004) avaliaram o comportamento do escoamento de vento em terrenos complexos extremos, sendo os estudos divididos em duas categorias. A primeira categoria contempla terrenos irregulares 3D com declividades de até 50°. A segunda categoria contempla taludes íngremes e penhascos em duas dimensões. Para avaliar de forma mais precisa e real, os pesquisadores uniram um modelo numérico multi-escala e ensaios em túnel de vento de camada limite, com o objetivo de formar uma ferramenta híbrida para avaliar o comportamento do vento em terrenos complexos. O túnel de vento tem como função servir de guia para o refinamento de dados, calibração e validação do modelo numérico. Como conclusão, os autores observaram que na presença de um morro, o escoamento é separado dentro de uma extensão, em diversos pontos, dependendo da orografia do terreno e da turbulência do escoamento. Os processos de separação e recolamento do escoamento são altamente transitórios, irregulares e imprevisíveis, como é de característica do escoamento turbulento, normalmente. Como cada local possui uma orografia e escoamento de vento distintos não é possível implementar uma generalização para terrenos complexos, sendo necessário o estudo particular de cada caso (DERICKSON; PETERKA, 2004).

No que tange a estabilidade atmosférica, Takahashi et al. estudou três tipos de estabilidade atmosférica: estável, instável e neutra. Este efeito foi analisado para um morro 3D em um túnel

de vento de camada limite, segundo um escoamento turbulento. Para as medições de velocidade foi utilizado o anemômetro 3D *Laser Doppler*. Neste estudo os autores coletaram dados para o perfil de velocidades média. Como resultados, os autores observaram que a velocidade média do vento não varia com a estabilidade do escoamento no morro. (TAKAHASHI et al., 2005).

No que tange a velocidade de rajada do vento, os pesquisadores Ngo e Letchford (2008), analisaram a influência das características topográficas neste quesito, incluindo uma comparação entre 4 normas internacionais. As normas analisadas são: ASCE / SEI 7-05, AS / NZS 1.170,2: 2002, AIJ: 2004, e CEN TC 250, sendo o intuito da pesquisa analisar a combinação terreno/altura e o multiplicador topográfico. As análises comparativas, entre as normas, mostraram que a ASCE/SEI 7-05 analisa a velocidade incremental do vento sobre e no entorno da orografia analisada, além de verificar as condições do terreno circunscrito. Nestas análises comparativas, esta norma é a única que considera a influência da rugosidade do terreno no aumento da velocidade do vento. Parecida com a norma AS / NZS 1.170,2, 2002, a norma da CEN TC 250: 2002 mostra perfis de vento consistentes, com limite inferior de declividade de 5%, porém não mostra diferenças significativas na velocidade incremental da influência das características topográficas. Por outro lado, a norma Japonesa AIJ: 2004, supõe que os efeitos da velocidade incremental dependem da inclinação topográfica, que vão até 60° ou declividades de 173,2%. O valor de declividade descrito por Ngo e Letchford é superior ao sugerido por Cook (1985), cujo valor limite para o escoamento ascendente foi de 30% de declividade.

Conforme os dados acima explicitados, a norma Japonesa tanto para seu limite inferior como para o superior, 13,2 e 173,2 % respectivamente, apresenta os maiores limites entre as normas comparadas. Esta norma é a única que prevê decréscimo na velocidade do vento na região da esteira. Como conclusão do estudo, os autores salientam que há uma significativa diferença entre as quatro normativas, segundo os efeitos da velocidade incremental. Segundo os autores, essas diferenças podem ocorrer por: declives limitantes inferiores e superiores, tipos de topografia: morros, cordilheiras e taludes. Os autores ainda enfatizam a revisão das normas já referidas, no tema em questão (NGO; LETCHFORD, 2008).

Com o avanço tecnológico, foi introduzido um instrumento de medição capaz de capturar dados com maior precisão. O dispositivo em questão é o PIV-*Particle Image Velocimetry*, o qual é capaz de capturar medições com uma resolução de 5 m em grande escala e é eficaz na captura campos 2D de velocidade média, tanto horizontalmente quanto verticalmente. Os pesquisadores Rasouli, Hangan e Siddiqui em 2009, utilizando este dispositivo, realizaram ensaios em túnel

de vento com expoente da lei de potência diversos modelos reduzidos de escala 1:3000, em terreno complexo. Os modelos reduzidos investigados são: um vale, um cume e um morro 3D. Os resultados obtidos mostram que, enquanto para os vales e morros, o escoamento é relativamente bem correlacionado, o escoamento no cume é fortemente influenciado pela topografia. As medições de velocidade média, pelo PIV comparadas com as sondas de Fio Quente, mostraram que são bem consistentes para os casos analisados. Além disso, o perfil de intensidade de turbulência foi bastante adequado para regiões onde não há recirculação. Já para a região do cume não há uma consistência entre os dois dispositivos analisados, segundo os autores isso deve-se ao fato da complexidade do escoamento na região, e também as limitações inerentes aos dispositivos (RASOULI; HANGAN; SIDDIQUI, 2009).

Matuella (2012) estudou o comportamento da camada limite atmosférica em terrenos complexos. No estudo a autora analisa a estrutura da camada limite, bem como, separação do escoamento. Para tanto, foram realizados ensaios experimentais de morros isolados, os quais nove modelos, sendo estes: quatro modelos 2D simétricos, quatro 3D simétricos e um assimétrico. A análise dos dados obtidos foi comparada por dois métodos analíticos: Jackson e Hunt (1985) e Davenport, Surry e Lemelin (1988). Além disso, a autora compara com métodos de previsão que são: Norma Brasileira – Cargas de Vento em edificações NBR 6123 (1988); *European Standard – EUROCODE 1 Actions on Structures*, CEN TC 250 (2005); *Australian/New Zeland Standard: Minimum Design Loads on Structures*, AZ/NZS 1170.2 (2002); *Architectural Institute of Japan AIJ* (2004); *American Society of Civil Engineering Standard, ASCE 7-95, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*; *National Building Code of Canada, NRCC* (2005). A análise comparativa entre as diferentes normas e métodos mostrou que não há um consenso entre os parâmetros a serem empregados para o carregamento de vento.

A linha de pesquisa de complexidade dos terrenos, ao longo dos anos, vem se tornando cada vez mais consistente pelos seus pesquisadores. Os meios de pesquisa têm grande importância neste desenvolvimento, seja por métodos numéricos, modelos reduzidos em túnel de vento ou medições *in loco*. Muitas vezes para tornar o método de avaliação mais preciso é necessário a obtenção de dados através de dois ou mais meios, isto sugere que é imprescindível o trabalho conjunto desses meios para uma melhor otimização do estudo. Dentre os estudos acima abordados, é perceptível que a investigação da camada limite em terrenos complexos teve uma grande evolução, entretanto, existem temas que ainda devem ser melhor estudados, seja por

meio de novos ensaios, aprimoramento de métodos analíticos e até mesmo de instrumentos capazes de adquirir bancos de dados mais confiáveis e amplos.

2.2.3 Estudos de parâmetros fundamentais

Os efeitos da escala em túnel de vento para um escoamento de camada limite atmosférica em uma região suburbana são importantes para análise do escoamento. Kozmar (2011), estudou diversas escalas, dentre as quais: 1:220, 1:250 e 1:400. Em seu estudo as análises foram realizadas para: velocidade média, intensidade de turbulência, tensões de cisalhamento para Reynolds turbulento. Resultados experimentais indicaram ser possível reproduzir o escoamento urbano em túnel de vento, para diferentes escalas sem perder a qualidade da simulação, em termos da escala e comprimento nas características físicas do escoamento. Porém não foi possível identificar, em escala reduzida duas características do fenômeno sendo estas observadas em escala real, as quais são: dependência da escala de comprimento integral na velocidade do vento de referência e o aumento linear integral com a altura. Segundo o autor os valores de comprimento de escala recomendados pelas normas são díspares, por exemplo na ESDU 85020 de 1985 os valores são significativamente maiores que outras normas internacionais (KOZMAR, 2011). O túnel de vento Professor Joaquim Blessmann possui o escoamento da camada limite na escala de 1:400.

Os estudos experimentais são de fundamental importância para um aprimoramento dos efeitos em zonas topográficas complexas. Com isso, alguns estudos sobre a zona de recirculação e recolamento formada por um objeto retangular sob incidência do escoamento em camada limite turbulenta. A recirculação na região analisada é caracterizada por um número de Reynolds analisado ficou entre 1400 e 19000, baseado na altura de passo e velocidade do escoamento livre (SHERRY; JACONO; SHERIDAN, 2010). Com escoamento incidindo da esquerda para direita do objeto analisado, a separação é consequência da ocorrência do gradiente de pressão adversa que em consequência disto promove o bloqueio a pouca distância do objeto. A separação do escoamento a barlavento acontece a uma distância horizontal de, aproximadamente, $1h$ a $1,2h$ (“ h ” é a altura da face do degrau imerso no escoamento). E o recolamento ocorre em, aproximadamente, $0,6d$ (“ d ” é a altura do morro). (LECLERCQ et al., 2001). Segundo a análise de dados, o comprimento de recolamento teve uma tendência a aumentar conforme o aumento do número de Reynolds, sendo estes divididos em 2 grupos: número de Reynolds abaixo de 8500 e acima de 8500. No primeiro grupo o recolamento é dependente do número de Reynolds e no segundo grupo é apenas afetado. Na figura 11 observa-

se as regiões de separação e recolamento do escoamento (SHERRY; JACONO; SHERIDAN, 2010).

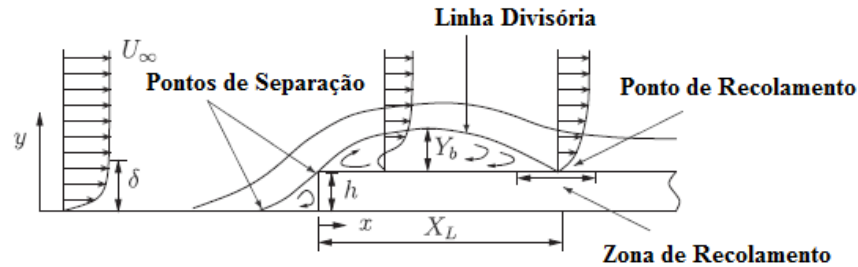


Figura 11 – Esquematização dos pontos de Separação e Recolamento do escoamento (fonte:SHERRY; JACONO; SHERIDAN, 2010).

Um estudo experimental em terrenos complexos, contemplou a análise do número de Reynolds e as características físicas que influenciam no escoamento. O estudo é de um parque eólico em construção e para se verificar as condições do empreendimento, um modelo reduzido, de escala 1:1500, foi ensaiado. Para medir as velocidades do vento utilizou-se sondas de pressão de rápida-resposta. Mastros foram instalados no local do parque para a comparação com ensaios experimentais. Na média pode ser observado que a velocidade nos mastros é maior que a velocidade obtida em ensaios experimentais, para ventos principais. Enquanto que a intensidade de turbulência medida nos mastros apresentou valores menores que os obtidos nos ensaios. Segundos os pesquisadores, essa discrepância entre a velocidade e intensidade deve-se ao fato de não ter sido introduzida a vegetação na rugosidade do terreno. Visto que, o objetivo era enfatizar as características do escoamento com alto número de Reynolds, minimizando as perturbações (MCAULIFFE; LAROSE, 2012).

3 MODELOS ANALÍTICOS PARA EFEITOS DE TERRENOS COMPLEXOS

Neste capítulo serão descritos os modelos analíticos e normas. Os modelos analíticos apresentados têm como enfoque principal o cálculo da influência da topografia complexa na velocidade de vento e são designados a seguir:

- a) Norma Brasileira: NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988);
- b) Norma Americana: American Society of Civil Engineering Standard – ASCE 7-10 (2010);
- c) Norma Australiana e Neo Zelandesa: AS/NZS 1170.2 (2011);
- d) Norma Canadense: *National building Code of Canada* – NBCC (2010);
- e) Norma Europeia: EUROCODE 1: *Actions on Structures* – CEN TC 250 (2010);
- f) Norma Japonesa: *Architetural Institute of Japan* – AIJ (2004);
- g) Modelo de Jackson e Hunt (1975);
- h) Modelo de Davenport, Surry e Lemelin (1988).

3.1 INTRODUÇÃO SOBRE MODELOS ANALÍTICOS E NORMAS TÉCNICAS

O cálculo de velocidade do vento, com influência de terrenos complexos, vem se aprimorando ao longo das pesquisas. Para a consistência dos modelos analíticos é necessário que se observem minuciosamente os parâmetros que interferem no escoamento. Para tanto, uma base de dados consolidada é essencial na aferição do modelo.

Na análise de dados, a sazonalidade é um fator que interfere no escoamento do vento. Segundo Ayotte, Davy e Choppin (2001), a análise temporal e espacial simplificada é realizada em relação à velocidade e direção do vento, para a previsão de pontos adjacentes aos coletados. Neste estudo os autores extrapolaram linearmente as principais variáveis do vento e a altura coletada. Estas extrapolações foram realizadas utilizando equações linearizadas, através de modelos simplificados de escoamento, admitindo um escoamento neutramente estratificado. Em análise dos dados encontrados, os autores explanam que quanto maior o tempo de obtenção de dados mais acurado e preciso são os resultados, com isso os resultados ficam mais próximos

da realidade. Entretanto, raramente, longos períodos de aquisição de dados são encontrados com continuidade, o que gera uma confiabilidade reduzida para o modelo analítico. Por isso, é importante que dados de campo sejam comparados com os modelos analíticos, mesmo que se tenha um modelo analítico bem conciso. Assim, ao comparar dados de campo com os resultados obtidos por modelagem, é possível avaliar se o modelo tem capacidade de representar a realidade, através de pequenas amostragens. Além de modelos lineares, como citado anteriormente, existem os modelos não-lineares, estes por sua vez, tendem a ser mais custosos computacionalmente, porém representam melhor a realidade. Alguns pesquisadores se destacaram neste estudo como Xu e Taylor (1992), Wood e Maison (1993) e Xu, Ayotte e Taylor (1994).

Este estudo tem como enfoque a análise de parâmetros das normas acima citadas, tendo como base dois modelos analíticos. Esses por sua vez, são primordiais para o entendimento de como se comporta a velocidades em situações de terrenos não-planos. Além disso, a equalização das normas em relação a NBR 6213, ajuda a comparar e nivelar as diferenças entre elas. Em consoante as normas acima referenciadas, é passível de serem identificados alguns pontos básicos para o cálculo das velocidades. A maioria das normas apresenta dois diferentes níveis de abordagem: método simplificado e método detalhado, de acordo com a rigidez da estrutura. Outro ponto são os tipos de terrenos que são diretamente afetados pela rugosidade do entorno a edificação. Sendo que, para a base dos cálculos é considerado um terreno plano, com a velocidade de referência a 10 m acima do nível do terreno. Além disso, é importante ressaltar que mesmo com bases de cálculo muito similares para a velocidade, nem sempre os fatores que estão contemplados em uma normatização estão nas outras. Assim, serão demonstrados os modelos analíticos e normas com referência a NBR 6123 (ABNT, 1988), porém onde não há concordância a notação será distinta.

3.2 NORMA BRASILEIRA: NBR-6123

A Norma Brasileira determina as forças estáticas devidas ao vento sobre uma estrutura através da velocidade característica. Por sua vez, a velocidade característica é função da velocidade básica (V_0), que possui distintos valores conforme localização, e dos fatores: topográfico (S_1), rugosidade, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2) e estatístico (S_3). Os fatores S_1 , S_2 e S_3 são valores que modificam a velocidade básica, fazendo com que, em geral, a velocidade característica seja maior que a básica (ABNT, 1988).

Morros ou taludes com altura “d” influenciam diretamente na velocidade do vento, consequentemente no perfil de velocidades, isto deve-se ao fato do efeito Venturi. O efeito atingirá o valor máximo para ventos que soprem perpendicular ao cume do morro e para um talude ou morro de grande largura, sendo assim considerado um escoamento 2D (BLESSMANN, J., 2013).

A deflexão da velocidade, sensível no plano vertical, é delimitada por uma altura de influência – h_i , sendo a medida a partir da base do morro ou talude. Esta altura é influenciada pela forma e dimensões do morro ou talude, bem como pelo gradiente de temperatura vertical do escoamento. Em geral, esta altura situa-se em torno de 3d a 4d (BLESSMANN, J., 2013).

Segundo Blessmann (2013), para morros ou taludes com inclinações até 17° o aumento de velocidade é proporcional a inclinação, causada pelo efeito Venturi. Entretanto para inclinações maiores que 17° o perfil de velocidades médias permanece constante, independente da inclinação. Isso deve-se ao fato de que no sopé do morro a barlavento forma-se um vórtice, mantendo com variações imperceptíveis as linhas de corrente que se formam com a inclinação de 17°.

3.2.1 Velocidade básica e característica do Vento

A velocidade básica, segundo a NBR-6123 (ABNT, 1988), é a máxima velocidade média obtida em um intervalo de 3 segundos, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos. Esta medição de velocidade é obtida na altura de 10 m de acima do terreno em campo aberto e plano. A velocidade básica de cada região é apresentada pelo gráfico das isopletras da velocidade básica no Brasil (figura 12) e possui intervalos de velocidade de 5 m/s.

A velocidade característica do vento V_k é a velocidade básica V_0 ajustada pelos fatores: topográfico (S_1), características da edificação e do terreno (S_2) e estatístico (S_3). Este valor de V_k , geralmente, é maior que a V_0 e pode ser descrita pela fórmula 1.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

V_0 = velocidade básica do vento para NBR 6123, em m/s;

V_k = velocidade característica do vento para NBR 6123, em m/s;

S_1 = fator topográfico para a NBR 6123, adimensional;

S_2 = fator de características do terreno e da edificação para a NBR 6123, adimensional;

S_3 = fator estatístico para a NBR 6123, adimensional.

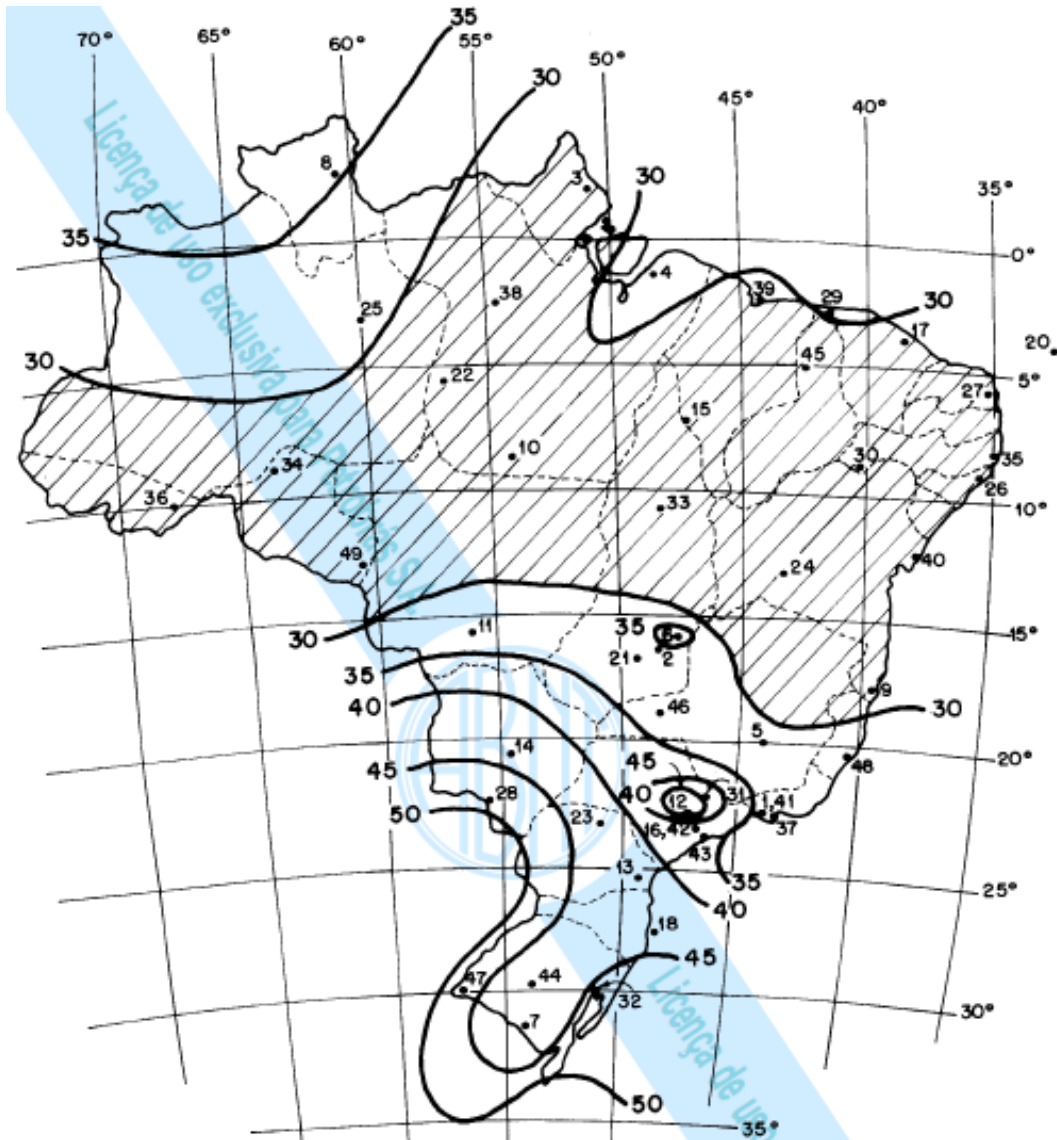


Figura 12 – Gráfico de isopletas da velocidade básica V_0 em m/s, para NBR 6123. (fonte: ABNT, 1988)

3.2.2 Fator topográfico S_1

O fator S_1 é responsável pelo ajuste da velocidade básica em relação à topografia do terreno, sendo esse dividido em dois grupos: planos ou fracamente acidentado ($S_1 = 1,0$) e taludes/morros.

Os taludes e morros são considerados alongados, de tal modo que admite-se um escoamento de ar 2D, soprando da esquerda para a direita (figura 13). O valor de S_1 é diferenciado pelos pontos A, B e C, para o ponto A (morros) o fator topográfico é $S_1=1,0$.

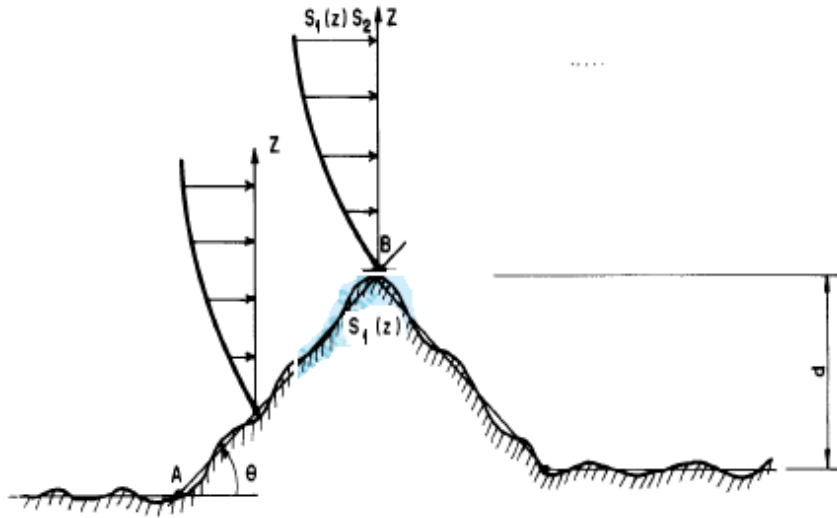


Figura 13 – Fator topográfico em morros, segundo a Norma Brasileira (fonte: ABNT, 1988)

Conforme prescrições da NBR-6123 (ABNT, 1988), no ponto B os valores de S_1 são divididos em três grupos de inclinação. As fórmulas 2, 3 e 4 mostram o cálculo do fator, conforme as inclinações, e para inclinações intermediárias é necessário interpolar. Para vales profundos, protegidos de ventos provindos de qualquer direção o valor de $S_1 = 0,9$.

$$S_1(z) = 1,0 \quad \theta \leq 3^\circ \quad (\text{fórmula 2})$$

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot \tan(\theta - 3^\circ) \quad 6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ \text{ e } S_1 \geq 1 \quad (\text{fórmula 3})$$

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot 0,31 \quad \theta \geq 45^\circ \text{ e } S_1 \geq 1 \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

$S_1(z)$ = fator topográfico em função da altura, adimensional;

z = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto a ser considerado, em metros;

d = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro, em metros;

θ = inclinação média do talude ou morro, em graus.

Os valores indicados pelas fórmulas acima 2 a 4 são aproximados. Para terrenos de maior complexidade e também para um resultado que reproduza mais fielmente a realidade é recomendado que sejam realizados ensaios em túnel de vento. Assim, presume-se que os modelos topográficos reduzidos, sejam idênticos a realidade e produzam um escoamento próximo ao real.

3.2.3 Fator de rugosidade S_2

O fator S_2 é responsável pelo ajuste da velocidade básica em relação à rugosidade do terreno, às dimensões da edificação e altura sobre o terreno. Considerando ventos fortes, com camada limite estavelmente neutra, a velocidade é influenciada pela altura acima do terreno, sendo majorada conforme o aumento de altura.

3.2.3.1 Rugosidade do terreno

A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias, os quais levam em consideração o montante de elementos que interferem no escoamento do vento:

- a) categoria I: superfícies lisas com grandes dimensões e mais de 5 km de extensão (sentido do vento incidente). Exemplos: mar calmo, lagos, rios;
- b) categoria II: terrenos abertos em nível do mar, com poucos obstáculos isolados (cota média do topo dos obstáculos menor ou igual a 1m). Exemplos: zonas costeiras planas, fazendas sem sebes ou muros, campos de aviação entre outros;
- c) categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos. Exemplos: sebes, muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações de pequena altura, subúrbios longe de grandes centros;
- d) categoria IV: terrenos cobertos por muitos obstáculos, com grande altura e próximos. Exemplos: zonas florestais, parques, bosques, subúrbios com muitas construções, pequenas cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas;
- e) categoria V; terrenos cobertos por muitos obstáculos, com grande altura e próximos. Exemplos: grandes florestas, centros de grandes cidades, complexos industriais desenvolvidos, a cota média dos obstáculos deve ser maior que 25 m.

3.2.3.2 Dimensões da edificação:

As dimensões da edificação são importantes para se definir o intervalo de tempo a ser usado no cálculo da velocidade média. Como a velocidade do vento varia continuamente e o valor médio pode ser calculado em quaisquer intervalos de tempo, o intervalo de tempo de 3s corresponde a rajadas cujas dimensões características são aproximadamente de 20 m. Quanto maior o intervalo de tempo utilizado no cálculo da velocidade média, conseqüentemente, maior será a dimensão abrangida pela rajada. As dimensões características são divididas em três classes “A”, “B” e “C”, cujos respectivos intervalos de tempo são, 3, 5 e 10 s. A norma ainda salienta que, para edificações que excedam 80 m, sendo esta a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal, o intervalo de tempo correspondente será determinado pelo anexo A da norma.

- a) 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.”;
- b) classe B: “Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 m.”;
- c) classe C: “Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.”

3.2.3.3 Altura sobre o terreno

O cálculo da velocidade de vento em uma determinada altura “z” depende do fator S_2 , o qual também é dependente dessa altura, assim o fator S_2 é obtido pela fórmula 5:

$$S_2(z) = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$S_2(z)$ = fator referente à classificação do terreno em função da altura;

b = parâmetro meteorológico conforme categoria e classe segundo a NBR 6123, adimensional;

F_r = fator de rajada, o qual é sempre correspondente à categoria II segundo a NBR 6123, adimensional;

z = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto a ser considerado, em metros;

p = parâmetro meteorológico conforme categoria e classe segundo a NBR 6123, adimensional.

Os parâmetros meteorológicos b , F_r e p podem ser visualizados segundo a tabela 1. Os parâmetros meteorológicos b e p são dependentes da categoria e classe a que está inserida a edificação, enquanto que o F_r é considerado, invariavelmente para a categoria II, porém varia para cada classe.

Tabela 1 – Fatores meteorológicos para a Norma Brasileira.

Categoria	Z_g (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,100	1,110	1,120
		p	0,060	0,065	0,070
II	300	b	1,000	1,000	1,000
		p	1,000	0,980	0,950
		F_r	0,085	0,090	0,100
III	350	b	0,940	0,940	0,930
		p	0,100	0,105	0,115
IV	420	b	0,860	0,850	0,840
		p	0,120	0,125	0,135
V	500	b	0,740	0,730	0,710
		p	0,150	0,160	0,175

(fonte: NBR-6123:ABNT, 1988)

3.2.4 Fator estatístico S_3

O fator estatístico S_3 tem por base os conceitos estatísticos e considera a vida útil da edificação e a segurança requerida. Considerando as definições anteriormente apresentadas da velocidade básica do vento V_0 , o qual apresenta um período de retorno médio de 50 anos, a probabilidade que V_0 seja igual ou superior nesse período é de 63%.

Os parâmetros de vida útil de 50 anos e a probabilidade de 63% são considerados adequados para edificações normais. Estas edificações correspondem a edificações comerciais ou residenciais e industriais com alto fator de ocupação, as quais são referenciadas no grupo 2 do quadro 1. Os valores mínimos do fator estatístico S_3 são descritos no quadro 1.

Quadro 1 – Valores mínimos do fator S_3 para Norma Brasileira.

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

(fonte: NBR-6123:ABNT, 1988)

Para outros períodos de exposição da edificação ao vento e outras probabilidades é necessária a conversão através de formulação. Assim, mantem-se a consideração dos conceitos estatísticos onde a velocidade do vento V_{0+} que tem uma probabilidade “ P_m ” de ser igualada ou excedida, no local considerado, pelo menos uma vez em “ m ” anos. Essa probabilidade é considerada com rajadas de 3 s de duração, para categoria de rugosidade II, na altura 10 m acima do terreno. A V_{0+} é então descrita segundo a fórmula 6 e o fator estatístico S_3 é descrito pela fórmula 7.

$$V_0^+ = V_0 \cdot S_3 \quad (\text{fórmula 6})$$

$$S_3 = 0,54 \cdot \left(-\frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right)^{-0,157} \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

V_0^+ = velocidade do vento com expoente da lei de potência probabilidade P_m ;

V_0 = velocidade básica do vento, em m/s;

$S_3(z)$ = fator estatístico, adimensional;

P_m = probabilidade na vida útil, em anos;

m = vida útil, em anos.

3.3 NORMA AMERICANA: ASCE 7-10 – *MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES*

A norma Americana considera para efeito de carregamento nas estruturas, provocado pela ação do vento, um conjunto simplificado de pressões e forças. Para efetuar os cálculos é necessário considerar alguns parâmetros que influenciam no carregamento do vento. Os parâmetros considerados envolvem a velocidade do vento básico em função da categoria de risco e localização, categoria de risco da edificação, categoria de exposição e fator topográfico. O procedimento de cálculo para a norma americana é dividido em 4 grupos: direcional para edificações altas, de envelopamento para edificações baixas, direcional para elementos, por exemplo, beirais e parapeitos e de túnel de vento. O procedimento utilizado para os cálculos do efeito topográfico será o procedimento direcional para edificações altas. Este método de cálculo foi escolhido por englobar os efeitos da topografia no método.

3.3.1 Velocidade básica do vento

A velocidade básica do vento é a velocidade do vento medida em um intervalo de tempo de 3 s, considerando uma rajada. Esta medida é obtida a 10 m acima do terreno e em uma categoria de exposição C, que será descrita nos próximos itens. Em regiões sujeitas à incidência de furações a velocidade básica do vento não deve ser inferior à velocidade do vento associada com a especificação do intervalo de recorrência média, assim, devem ser ajustadas para equivalência a uma velocidade de rajada de vento de 3 segundos a 10 m acima do solo na Exposição C (ASCE, 2010). A velocidade básica do vento é diferenciada conforme o risco em que a edificação está inserida. Os riscos iminentes são divididos em quatro grupos: I, II, III e IV. As velocidades possuem probabilidades para um período de retorno de 50 anos, assim as probabilidades para as categorias I, II, III e IV são respectivamente: 15%, 7%, 3% e 3%.

3.3.2 Pressão de velocidades

A pressão de velocidade “ q_z ” (fórmula 8) é função da altura “ z ” e depende dos fatores: topográfico, direcionalidade, do coeficiente de exposição da pressão de velocidades além da velocidade no local analisado.

$$q_z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_D \cdot V_0^2 \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

q_z = pressão de velocidades para norma Americana, em N/m^2 ;

K_z = fator de exposição de pressão de velocidades para norma Americana, adimensional;

K_{zt} = fator topográfico para norma Americana, adimensional;

K_D = fator de direcionalidade para norma Americana, adimensional;

V_0 = velocidade básica, em m/s.

3.3.3 Velocidade característica

Na norma americana ASCE 7-10 (2010) não é explícita a velocidade modificada pelos fatores que influenciam a velocidade básica. Assim, seguindo o mesmo conceito da NBR 6123 (1988) faz-se um rearranjo da formula 8 para obtermos a velocidade modificada, conforme fórmula 9.

$$V_K = \sqrt{K_z \cdot K_{zt} \cdot K_D} \cdot V_0 \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

V_K = velocidade característica, em m/s;

K_z = fator de exposição de pressão de velocidades, adimensional;

K_{zt} = fator topográfico, adimensional;

K_D = fator de direcionalidade, adimensional;

V_0 = velocidade básica, em m/s.

3.3.4 Fator de exposição de pressão de velocidades

A altitude do terreno e os efeitos por ele induzidos no escoamento do vento são considerados no fator de exposição de pressão de velocidade (K_z). Este fator é baseado na categoria de exposição a qual o terreno está inserido e pode ser determinado pelas fórmulas 10 e 11. Os parâmetros de rajada, altura nominal de camada limite atmosférica e altura mínima são descritos na tabela 2.

$$K_Z = 2,01 \cdot \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \rightarrow 4,6\text{m} \leq Z \leq Z_g \quad (\text{fórmula 10})$$

$$K_Z = 2,01 \cdot \left(\frac{4,6}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \rightarrow Z < 4,6\text{m} \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

K_Z = fator de exposição de pressão de velocidades, adimensional;

Z_g = altura nominal da camada limite atmosférica, em metros;

Z = altura acima do terreno, em metros;

α = expoente da lei logarítmica da velocidade de rajada em um tempo de 3s para a norma Americana, adimensional.

Tabela 2 – Parâmetros α , Z_g e Z_{\min} de acordo com a norma americana.

Exposição	α	Z_g	Z_{\min}
		(m)	(m)
B	7,00	365,76	9,14
C	9,05	274,32	4,57
D	11,50	213,36	2,13

(fonte: adaptado ASCE, 2010)

A altura mínima (Z_{\min}) descrita pela tabela 2, deve ser maior que 0,6 h, sendo “h” a altura da edificação em análise. Para edificações com altura menor ou igual a altura mínima utiliza-se a própria altura da tabela.

3.3.5 Fator de direcionalidade do vento

O fator de direcionalidade do vento K_D é responsável pelas características da direção do vento incidente, as quais são influenciadas pelo tipo de edificação. Segundo Simiu (2011), a ausência de um padrão da direcionalidade das velocidades do vento faz com que as pressões calculadas sejam muito conservadoras. Porém, para compensar com esse conservadorismo, são aplicados os fatores de direcionalidade os quais reduzem as pressões calculadas. Entretanto quando não

há informações mais acuradas da direção do vento e necessário utilizar um fator neutro igual a 1, mantendo-se conservadora (SIMIU, 2011). O quadro 2 mostra os valores para o fator de direcionalidade conforme a estrutura analisada, podendo, somente, ser usado quando combinado com outros carregamentos.

Quadro 2 – Fator de direcionalidade K_D de acordo com a norma Americana.

Descrição	K_D
Edifícios e estruturas	0,85
Chaminés quadradas, tanques e estruturas semelhantes	0,90
Chaminés hexagonais e redondas, tanques e estruturas semelhantes, torres treliçadas (exceto triangular, quadrada e retangular)	0,95

(fonte: adaptado ASCE, 2010)

A exposição da edificação ou estrutura deve ser determinada para dois setores. Os setores se estendem a 45° para cada lado do vento pré-selecionado. A exposição nestes dois setores é influenciada pela rugosidade do terreno e pelo tipo exposição.

3.3.6 Fator de rugosidade do terreno

O fator de rugosidade do terreno é definido a cada 45° a partir da direção anteriormente estabelecida. As categorias são divididas em 3 grupos: B, C e D (ASCE, 2010):

- a) B: é definida por áreas urbanas e suburbanas, áreas arborizadas, ou por terrenos com grandes obstruções e fechadas;
- b) C: é composta por terreno aberto com construções esparsas e construções menores que 9,1 m, esta categoria inclui também pastagens;
- c) D: considera áreas planas sem obstrução e superfície de água, este grupo inclui salinas, banhados e geleiras ininterruptas.

3.3.7 Fator de exposição

O fator de exposição é dividido em três categorias: B, C e D:

- a) B: compreende edificações com a altura média menor ou igual a 9,1 m. O fator de exposição B é aplicável quando a rugosidade da superfície, prevalece à barlavento com expoente da lei de potência uma distância superior a 457 m. Para edificações com altura maior que 9,1 m a distância deve ser superior a 792 m;
- b) C: é aplicável a todos os casos onde as categorias B e D não se aplicarem;

- c) D: é aplicável quando a rugosidade do terreno, prevalece à barlavento com expoente da lei de potência uma distância superior a 1524 m ou a 20 vezes a altura da edificação, o que for maior. Para zonas de transição deve se levar em conta a que resultar em maior força de vento.

3.3.8 Fator topográfico

O fator topográfico (K_{zt}) considera o efeito do incremento de velocidade do vento gerado por morros isolados, taludes e cumes (figura 14), o que constitui mudanças significativas na orografia do terreno. Para incluir o efeito da mudança de topografia é necessário que sejam atendidas as seguintes restrições. Caso as condições abaixo não forem cumpridas o fator topográfico deve ser $K_{zt} = 1,0$.

- morro isolado, talude ou cume não devem conter obstruções à barlavento por outra topografia semelhante, deve ser considerada a menor distância horizontal, considerado a partir do cume do morro, entre 3220 m e 100 vezes a altura da topografia característica;
- morro isolado, talude ou cume deve ser projetada acima da altura característica do terreno à barlavento, cerca de 3220 m de raio por um fator de 2 ou mais;
- a estrutura deve situar-se na metade superior do morro ou cume ou próximo a crista de um talude.

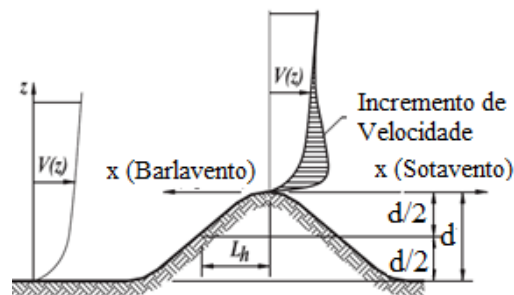


Figura 14 – Esquemática de morros para norma americana (fonte: adaptado ASCE, 2010)

A formulação do fator topográfico para a norma americana ASCE/SEI 7-10 é descrito pela fórmula 12.

$$K_{zt} = (1 + K_1 + K_2 + K_3)^2 \quad (\text{fórmula 12})$$

Os parâmetros para o cálculo de K_1 , K_2 e K_3 , descritos pelo fator de atenuação de altura e pelo fator de atenuação horizontal, respectivamente, γ e μ são descritos na tabela 3. Enquanto que o

fator K_1 é o obtido pela tabela, os demais fatores podem ser determinados também a partir das fórmulas 13 e 14.

$$K_2 = 1 - \frac{|x|}{\mu \cdot L_h} \quad (\text{fórmula 13})$$

$$K_3 = e^{-\frac{\gamma z}{L_h}} \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

K_{Zt} = fator topográfico para norma Americana, adimensional;

K_1 = considera a forma característica da topografia fica e máximo efeito de aumento de velocidade para norma Americana, adimensional;

K_2 = considera a redução do incremento de velocidades com a distância à barlavento ou à sotavento da crista para norma Americana, adimensional;

K_3 = considera a redução do incremento de velocidade com altura acima do terreno para norma Americana, adimensional.

x = distância horizontal a partir da crista, em metros.

μ = fator de atenuação horizontal para norma Americana, adimensional;

L_h = distância à barlavento a partir da crista para onde a diferença de elevação do solo é metade da altura do morro ou talude, para norma Americana, em metros;

z = altura acima da superfície do terreno, em metros;

γ = fator de atenuação de altura para a norma Americana, em metros.

Tabela 3 – Parâmetros μ e γ segundo a norma Americana.

Parâmetros para Incremento de Velocidade para Morros e Taludes						
Morro	$K_1/(d/L_h)$			γ	μ	
	Exposição				Barlavento	Sotavento
	B	C	D			
2D Morros	1,30	1,45	1,55	3,00	1,50	1,50
2D Taludes	0,75	0,85	0,95	2,50	1,50	4,00
3D Morros Assimétricos	0,95	1,05	1,15	4,00	1,50	1,50

(fonte: adaptado ASCE, 2010)

3.4 NORMA AUSTRALIANA E NEOZELANDESA: AS/NZS 1170.2

A norma Australiana/Neozelandesa estabelece valores de carregamento para o projeto de estruturas submetidas à incidência do vento. Com isso, pela norma é possível determinar as velocidades do vento, as velocidades de projeto locais, pressões e, por fim, calcular as ações do vento. Para verificarmos as forças devidas ao vento que uma edificação está submetida é necessário o cálculo da velocidade local, ou segundo conceituação da NBR 6123 (1988): velocidade característica. Para tanto, é necessário obter a velocidade básica e definir alguns fatores como: topográfico, do terreno, direcionalidade e de proteção, que são modificadores conforme a situação da edificação.

3.4.1 Velocidade regional do vento

A velocidade regional do vento V_R , em m/s, é a velocidade de rajada do vento medida em um intervalo de tempo de 3 s. Sendo definida por 8 direções cardinais do local analisado e separada por duas regiões principais: ciclônica e não-ciclônica. Essas velocidades são obtidas a uma altura “z” acima do terreno. Para regiões ciclônicas, as velocidades regionais são multiplicadas pelos fatores F_C e F_D . Os fatores F_C e F_D para as regiões C e D, respectivamente são implementados para incluir as incertezas adicionais na previsão das velocidades de vento nas regiões ciclônicas. Os valores são dependentes de “R” que é o inverso da probabilidade anual da velocidade do vento ser excedida. Os valores dos fatores são classificados em dois grupos: $R \geq 50$ anos: $F_C = 1,05$ e $F_D = 1,10$ e $R < 50$ anos: $F_C = F_D = 1,00$.

A velocidade local ou como a NBR 6123 classifica: velocidade característica é calculada considerando a própria velocidade básica do vento na região e alguns fatores. Esses fatores correspondem a topografia da região, ao terreno/altura, a direcionalidade do vento e a proteção (fórmula 15).

$$V_{sit,\beta} = M_D \cdot M_{z,cat} \cdot M_s \cdot M_t \cdot V_0 \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

$V_{sit,\beta}$ = velocidade local para a norma Australiana/Neozelandesa, em m/s;

$M_{z,cat}$ = multiplicador do terreno/altura para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional;

M_t = multiplicador topográfico para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional;

M_D = multiplicador de direcionalidade para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional;

M_s = multiplicador de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional;

V_0 = velocidade regional para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional.

3.4.2 Multiplicador de Terreno/Altura

O multiplicador de terreno/altura é função das obstruções que constituem a rugosidade do terreno durante à incidência de vento. Este multiplicador é dividido conforme a categoria em que o terreno está inserido, conforme a descrição abaixo:

- a) Categoria 1: terreno aberto com pouca ou nenhuma obstrução e superfície de água;
- b) Categoria 2: superfícies aquáticas, terreno aberto, poucas obstruções bem espalhadas com altura entre 1,5 m a 10 m;
- c) Categoria 3: terreno com inúmeras obstruções espaçadas de 3 m a 5 m de altura, áreas de habitação suburbana;
- d) Categoria 4: terreno com muitas obstruções com alturas entre 10 m e 30 m, obstruções espaçadas, grandes centros urbanos e complexo industrial.

Tabela 4 – Multiplicador de terreno/altura para regiões A/B/W e C/D, segundo a norma Australiana e Neozelandesa.

Multiplicador Terreno/Altura						
Altura (Z)	A, B e W				C e D	
	Categorias				Categorias	
(m)	1	2	3	4	1 e 2	3 e 4
≤ 3	0,99	0,91	0,83	0,75	0,90	0,80
5	1,05	0,91	0,83	0,75	0,95	0,80
10	1,12	1,00	0,83	0,75	1,00	0,89
15	1,16	1,05	0,89	0,75	1,07	0,95
20	1,19	1,08	0,94	0,75	1,13	1,05
30	1,22	1,12	1,00	0,80	1,20	1,15
40	1,24	1,16	1,04	0,85	1,25	1,25
50	1,25	1,18	1,07	0,90	1,29	1,29
75	1,27	1,22	1,12	0,98	1,35	1,25
100	1,29	1,24	1,16	1,03	1,40	1,40
150	1,31	1,27	1,21	1,11	1,40	1,40
200	1,32	1,29	1,24	1,16	1,40	1,40

(fonte: adaptado AS/NZS, 2011)

Para direções de vento onde existam diferentes tipos de terrenos é necessário fazer a média ponderada entre os diferentes fatores de terreno. Para se ponderar é calculado o valor médio ao longo da distância média à barlavento do morro ou edificação correspondente a uma altura “z” acima do terreno. Assim a fórmula 16 representa o valor ponderado:

$$X_i = Z_{0,r} \cdot \left(\frac{Z}{0,3 \cdot Z_{0,r}} \right)^{1,25} \quad (\text{fórmula 16})$$

Onde:

X_i = distância à sotavento a partir de uma nova rugosidade para a posição na qual a altura desenvolvida é menor ou igual Z , para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

$Z_{0,r}$ = é a maior entre dois comprimentos de rugosidade entre fronteira (tabela 5), para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

Z = altura de referência da estrutura acima do terreno.

Tabela 5 – Comprimento de rugosidade para cada categoria de terreno, segundo a norma Australiana e Neozelandesa.

Categoria do Terreno	Comprimento de Rugosidade
	(m)
1	0,002
2	0,02
3	0,2
4	2

(fonte: adaptado AS/NZS, 2011)

3.4.3 Multiplicador de direcionalidade

O fator de direcionalidade para as regiões B, C e D é classificado em dois grupos. O primeiro grupo é quando o fator é utilizado para “determinação das forças resultantes e momentos nas edificações e ações do vento em elementos estruturais”, e o valor a ser utilizado é $M_D = 0,95$. Para o outro grupo o valor a ser utilizado é $M_D = 1,00$. Para as categorias A e W os valores do multiplicador dependem da direção cardinal variando de 0,85 a 1.

3.4.4 Multiplicador de proteção

O multiplicador de proteção é utilizado quando é implementado na direção do vento uma proteção, a fim de mitigar os efeitos causados pela incidência do vento na estrutura. Segundo a AS/NZS 1170.2 (2011), a proteção por árvores não é permitida e este multiplicador é apropriado apenas para uma direção particular de incidência, sendo indicado pela tabela 6.

Tabela 6 – Multiplicador de proteção, segundo a norma Australiana e Neozelandesa.

Parâmetro	Multiplicador de Proteção
(S)	(Ms)
≤ 1,5	0,7
3,0	0,8
6,0	0,9
≥ 12	1,0

(fonte: adaptado AS/NZS 1170.2, 2011)

O multiplicador de proteção deve ser igual a 1,0 quando a média do gradiente a barlavento for maior que 0,2, ou quando os efeitos da proteção não podem ser aplicados. Para valores intermediários deve ser realizado interpolação linear. O parâmetro de proteção “S” descrito na tabela 6 é determinado pelas fórmulas 17 e 18:

$$S = \frac{l_s}{\sqrt{h_s \cdot b_s}} \quad (\text{fórmula 17})$$

$$l_s = h \cdot \left(\frac{10}{n_s} + 5 \right) \quad (\text{fórmula 18})$$

Onde:

S = parâmetro de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional;

l_s = espaçamento médio entre edifício de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

h_s = altura média do telhado dos edifícios de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

b_s = largura média dos edifícios de proteção para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

h = altura média do telhado, acima do terreno, da estrutura protegida para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

n_s = número de edifícios de proteção dentro de um setor de 45° com raio de 20 vezes h para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional.

3.4.5 Multiplicador topográfico

O multiplicador topográfico é dividido em 2 grupos. O primeiro grupo é locais com altura maior do que 500 m acima do nível do mar, e é descrito segundo a fórmula 19. Para demais casos é necessário utilizar o maior valor entre: $M_t = M_h$ ou $M_t = M_{lee}$.

$$M_t = M_h \cdot M_{lee} \cdot (1 + 0,00015 \cdot E) \quad (\text{fórmula 19})$$

Onde:

M_h = Multiplicador de forma do morro para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional;

M_{lee} = multiplicador do efeito de sotavento, pode ser utilizado 1,0 para a norma Australiana/Neozelandesa, adimensional;

E = elevação média do terreno acima do nível do mar para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros.

O multiplicador de forma do morro M_h deve ser considerado para cada direção cardinal a ser analisada. Deve ser levado em consideração a seção topográfica mais adversa que ocorre dentro de um ângulo de $22,5^\circ$ para cada lado da direção cardinal em análise, e considerando os seguintes itens:

- a) $d/(2L_u) < 5\%$, $M_h = 1,0$;
- b) $5\% \leq d/(2L_u) \leq 45\%$ M_h é descrito pela fórmula 20:

$$M_h = 1 + \left(\frac{d}{3,5 \cdot (Z + L_1)} \right) \times \left(1 - \frac{|x|}{L_2} \right) \quad (\text{fórmula 20})$$

- c) $d/(2L_u) > 45\%$, dentro da zona de separação, é descrito pela fórmula 21:

$$M_h = 1 + 0,71 \cdot \left(1 - \frac{|x|}{L_2} \right) \quad (\text{fórmula 21})$$

- d) $d/(2L_u) > 45\%$, em outro lugar dentro da zona topográfica, é dada pela fórmula 20, do alínea b.

Onde:

d = altura do morro ou talude, em metros;

L_u = distância horizontal à barlavento a partir do cume do morro ou talude até a metade da altura, para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

x = distância horizontal à sotavento da crista do morro ou talude, metros;

L_1 = escala horizontal para determinar a variação vertical de M_h , sendo maior que $0,36 L_u$ ou $0,4 H$, para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

L_2 = escala horizontal para determinar a variação horizontal de M_h , deve ser tomado como $4L_1$ a barlavento para todos tipos e a sotavento para morros e cumes, ou $10 L_1$ a sotavento para taludes, para a norma Australiana/Neozelandesa, em metros;

Z = altura acima do topo do terreno, em metros.

As figuras 15 e 16 ilustram as variáveis apresentadas descritas anteriormente.

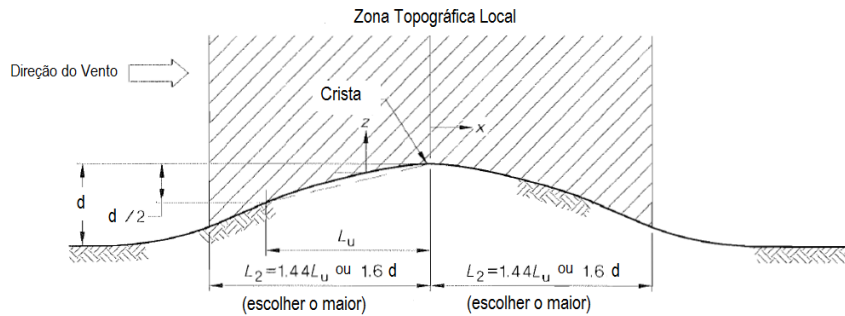


Figura 15 – Esquemática de morros para norma Australiana e Neozelandesa (fonte: AS/NZS, 2011)

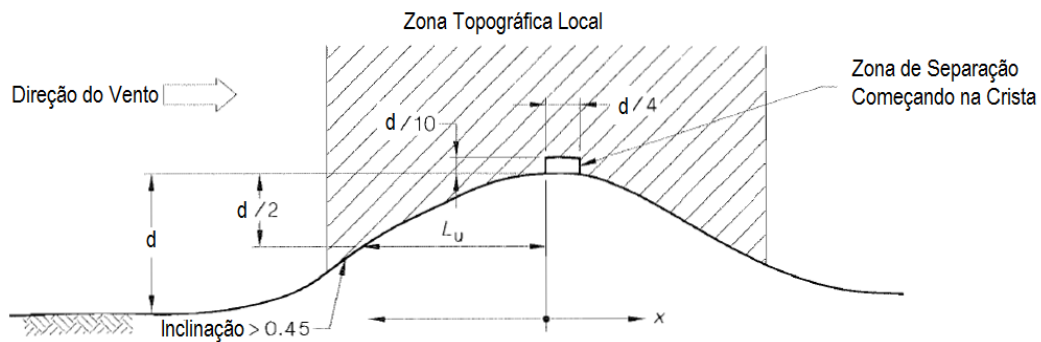


Figura 16 – Esquemática da zona de separação em cumes de morros para norma Australiana e Neozelandesa (fonte: AS/NZS, 2011)

Quando a altura acima da topografia for igual a zero, ou seja, na própria crista do morro ou talude, os valores adotados para M_h devem ser obtidos na tabela 7.

Tabela 7 – Multiplicador de forma do morro segundo a norma Australiana e Neozelandesa.

Inclinação Barlavento (d/2Lu)	Multiplicador de forma do morro (Mh)
< 0,05	1,00
0,05	1,08
0,10	1,16
0,20	1,32
0,30	1,48
≥ 0,45	1,71

(fonte: adaptado AS/NZS, 2011)

O fator do efeito de sotavento M_{lee} é adotado para locais na Nova Zelândia, para outros locais o valor adotado é 1,00. Este valor pode ser igual a 1,35, quando o local analisado está dentro da sombra de sotavento, ou seja, em um intervalo de 12 km a partir da crista (AS/NZS, 2011).

3.5 NORMA CANADENSE: NBCC

A norma Canadense define três tipos de abordagens para o cálculo dos efeitos do vento nas estruturas. O primeiro modelo de cálculo é definido como procedimento simplificado, sendo utilizado na maioria das aplicações de carregamento do vento, incluindo estruturas e revestimentos em edificações de pequena e média alturas. Para este procedimento a estrutura é admitida como rígida, assim o cálculo das ações devidas ao vento é considerado de forma estática, desconsiderando a resposta dinâmica.

O segundo modelo de cálculo é o procedimento detalhado, este, por sua vez, é considerado sempre que a edificação for suscetível a cargas dinâmicas, onde são geradas por vibrações induzidas pelo vento. As edificações por este procedimento calculadas são chamadas flexíveis. Assim, para a aplicação deste procedimento são necessários alguns parâmetros que englobam:

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

O terceiro procedimento é o ensaio em túnel de vento. Este procedimento é o mais indicado quando é necessário ter uma resposta mais exata da resposta da edificação frente à ação do vento. Este procedimento deve ser utilizado quando as estruturas analisadas são muito diferentes das pré-estabelecidas em norma. Com este procedimento é possível determinar os

coeficientes de pressão exterior nas fachadas da edificação, sendo essas fundamentais para o carregamento de vento.

3.5.1 Velocidade média do vento

A norma Canadense considera a velocidade de partida do vento como sendo a média da velocidade horária. Esta velocidade é coletada a 10 m acima do nível do solo em terreno plano e aberto. A norma associa três probabilidades anuais de ocorrência, 0,01, 0,033 e 0,1, para valores de pressão de referência do vento.

Para o cálculo da velocidade a uma dada altura e considerando as condições da edificação e do terreno é necessário utilizar a fórmula 22.

$$V_Z = \bar{V} \cdot \sqrt{C_{eZ}} \quad (\text{fórmula 22})$$

Onde:

V_Z = velocidade na altura em análise para a norma Canadense, em m/s;

\bar{V} = velocidade média para a norma Canadense, em m/s;

C_{eZ} = coeficiente de exposição na altura em análise para a norma Canadense, adimensional.

3.5.2 Fator de exposição

O fator de exposição pela norma Canadense é descrito por dois procedimentos: simplificado e para o detalhado. O procedimento simplificado, como o próprio nome já diz, é simplificado e depende basicamente da altura da edificação, variando entre 0,9 a 2. Devido ao procedimento ser muito simplório e podendo incorrer em erros optou-se por utilizar o modelo detalhado.

O fator de exposição, para o procedimento detalhado, é baseado no perfil de velocidades média. Assim, este fator pode varia consideravelmente conforme a rugosidade do terreno onde o vento sopra antes de atingir a edificação. Para se calcular efetivamente o fator de exposição é necessário adequar o tipo de terreno segundo a exposição A ou B. A exposição “A” é descrita para terrenos abertos com edificações, obstruções espalhadas, mares e lagos. A exposição “B” é descrita por áreas suburbanas e urbanas, considerando centro de grandes cidades, terrenos arborizados, florestas, ou seja, terrenos rugosos. Conforme a exposição do terreno há um fator

de exposição mais adequado, com isso a norma define as fórmulas para cada fator conforme sua exposição, fórmulas 23 e 24.

$$C_e = \left(\frac{Z}{10}\right)^{0,20}, 0,9 \leq C_e \rightarrow \text{Exposição "A"} \quad (\text{fórmula 23})$$

$$C_e = 0,7 \times \left(\frac{Z}{12}\right)^{0,30}, 0,7 \leq C_e \rightarrow \text{Exposição "B"} \quad (\text{fórmula 24})$$

Onde:

C_e = fator de exposição;

Z = altura acima do terreno, m.

A exposição B só deve ser empregada quando a rugosidade do terreno, a barlavento, persista por no mínimo 1,0 km ou 20 vezes a altura da edificação, sendo que o fator de exposição deve variar de acordo com o terreno, caso a rugosidade seja diferente entre as regiões.

3.5.3 Velocidade incremental do vento incidentes em morros e taludes

As edificações quando estão construídas a barlavento e no topo de morros e taludes, sendo morros com inclinação maior que 10%, sofrem um acréscimo de velocidade quanto mais próxima do cume. O fator de exposição, considerado em uma altura “z” acima do solo, é igual ao fator de exposição em um terreno plano multiplicado por um fator $(1 + \Delta V(z))^2$, cujo parcela $\Delta V(z)$ é a velocidade incremental do vento a uma dada altura. Sendo que este cálculo é válido tanto para o procedimento simplificado como para o detalhado, porém há uma diferenciação entre morros e taludes (fórmula 25).

$$C_e^* = C_e(z) \left\{ 1 + \Delta V_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{|x|}{k L_h} e^{-p^{**} \frac{Z}{L_h}} \right) \right\}^2 \quad (\text{fórmula 25})$$

Onde:

C_e^* = fator de exposição modificado para emprego em morros e taludes, para a norma Canadense, adimensional;

C_e = fator de exposição para a norma Canadense, adimensional;

$\Delta V_{m\acute{a}x}$ = velocidade incremental do vento para a norma Canadense, adimensional;

p^{**} = coeficiente de redução da velocidade incremental com a altura para a norma Canadense, adimensional;

$|x|$ = módulo do comprimento horizontal a partir do cume para a norma Canadense, em metros;

K = parâmetro de cáculo da máxima velocidade incremental do vento sobre morros para a norma Canadense, adimensional;

L_h = distância horizontal a partir do cume ao ponto a barlavento onde a altura da elevação é $d/2$ para a norma Canadense, em metros.

Os valores dos parâmetros p^{**} e $\Delta V_{m\acute{a}x}$ dependem da forma e da inclinação do morro. Valores representativos podem ser obtidos na tabela 8. Além disso, para o melhor entendimento de alguns parâmetros é necessário visualizar figura 17. Para $d/L > 0,5$, assume-se que $d/L = 0,5$ e substitui-se $2d$ por L na equação do coeficiente de exposição.

Tabela 8 – Parâmetros p^{**} e $\Delta V_{m\acute{a}x}$ segundo a norma Canadense.

Forma do morro	$\Delta V_{m\acute{a}x}$	p^{**}	k	
			x < 0	x > 0
Cumes 2D	2,2 d/L	3	1,5	1,5
Taludes 2D	1,3 d/L	2,5	1,5	4
Morros 3D assimétricos	1,6 d/L	4	1,5	1,5

(fonte: adaptado NBCC, 2010)

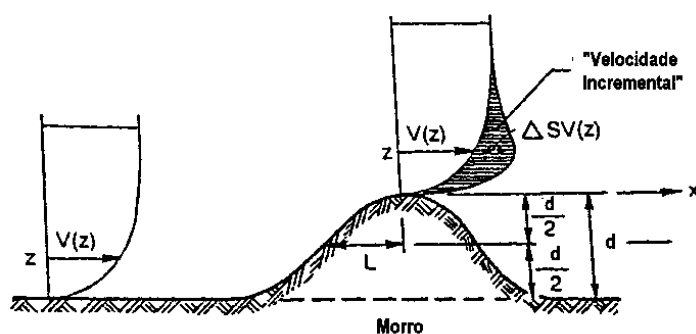


Figura 17 – Esquematisação de morros para a norma Canadense (fonte: NBCC, 2010)

O declive máximo do morro é $d/2L$ para morros de formas arredondadas. As fórmulas consideram que o vento se aproxime do morro ao longo de sua inclinação máxima, de modo a determinar o maior valor da velocidade incremental próxima ao cume do morro. Para inclinações menores que 10% a velocidade incremental é insignificante ou não é verificada.

3.6 NORMA EUROPÉIA: EN 1991 – EUROCODE 1: *ACTIONS ON STRUCTURES* – CEN TC 250

A norma Europeia considera para efeito de carregamento nas estruturas, provocadas pela ação do vento, um conjunto simplificado de pressões ou forças cujos efeitos são equivalentes aos provocados pela ação extrema do vento turbulento. No que se refere a influência da topografia no carregamento do vento, para esta norma só há mudança no perfil de velocidades quando a inclinação média da topografia à sotavento for superior a 5%. Tal declividade aplica-se para morros, taludes, penhascos e vales.

3.6.1 Velocidade básica do vento

A velocidade básica do vento (V_e) para a norma europeia é definida como função da velocidade básica fundamental, da direção e da época do ano em que é analisado. O valor fundamental da velocidade do vento básico ($V_{b,10}$), é o vento cuja velocidade média de 10 min, independente da direção e época do ano, a 10 m acima do nível do terreno, em campo aberto com vegetação rasteira e isolada de obstáculos, separados em uma distância mínima de 20 vezes a altura do obstáculo. O período de recorrência descrito por esta norma é de 50 anos, com uma probabilidade de 0,02. Assim a velocidade básica do vento é expressa pela fórmula 26.

$$V_{b,10} = V_{b,f} \cdot C_D \cdot C_S \quad (\text{fórmula 26})$$

Onde:

$V_{b,10}$ = velocidade básica em função da direção e época do ano, medida a 10 m de altura e com uma média de 10 min em terreno aberto (categoria II), para a norma Europeia, em m/s;

$V_{b,f}$ = velocidade básica fundamental do vento, para a norma Europeia, em m/s;

C_D = fator de direcionalidade do vento para a norma Europeia, adimensional;

C_S = fator de época do ano para a norma Europeia, adimensional.

O tempo de recorrência para as velocidades analisadas acima são de 50 anos, o que equivale a uma probabilidade de 0,02, porém se o tempo de recorrência for diferente a velocidade básica deve ser multiplicada por um fator de probabilidade C_p , o qual é descrito pela fórmula 27.

$$C_p = \left(\frac{1 - K_f \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K_f \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (\text{fórmula 27})$$

Onde:

C_p = fator de probabilidade para a norma Europeia, adimensional;

K_f = parâmetro de forma para a norma Europeia, adimensional, valor recomendado $K_f = 0,2$;

n = expoente para a norma Europeia, adimensional, valor recomendado $n = 0,5$;

p = probabilidade para a norma Europeia, adimensional.

3.6.2 Velocidade média do vento

A velocidade média do vento (V_m) para a norma europeia é definida como função da velocidade básica, descrita anteriormente, e dos fatores de rugosidade (C_r) e topografia (C_t) do terreno (fórmula 28). A velocidade média, assim como os fatores variam conforme a altura a ser analisada.

$$V_m(z) = V_{b,10} \cdot c_r(z) \cdot C_t(z) \quad (\text{fórmula 28})$$

Onde:

$V_m(z)$ = velocidade média em função da altura para a norma Europeia, em m/s;

$V_{b,10}$ = velocidade básica do vento para a norma Europeia, em m/s;

$c_r(z)$ = fator de rugosidade em função da altura para a norma Europeia, adimensional;

$c_t(z)$ = fator topográfico em função da altura para a norma Europeia, adimensional.

3.6.3 Fator de rugosidade do terreno

O fator de rugosidade do terreno considera a variabilidade da velocidade média do vento no local de análise. Sendo causado devido à altura acima do nível do solo e a rugosidade do terreno

a barlavento da estrutura na direção do vento considerada. Este fator é determinado com base no perfil de velocidade logarítmico em função da altura “z” acima do terreno.

O fator de rugosidade é dividido em dois grupos conforme a altura que está sendo analisada (fórmulas 29 e 30).

$$C_r(Z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right); Z_{min} \leq Z \leq Z_g \quad (\text{fórmula 29})$$

$$C_r(Z) = C_r(Z_{min}); Z \leq Z_{min} \quad (\text{fórmula 30})$$

Onde:

$C_r(Z)$ = fator de rugosidade em função da altura;

K_r = fator de terreno para norma Europeia, adimensional;

Z = altura, em metros;

Z_0 = comprimento de rugosidade, em metros;

Z_{min} = altura mínima, em metros;

Z_g = altura máxima, considerar 200 m.

O fator de terreno (K_r) depende do comprimento de rugosidade Z_0 calculado e do comprimento de rugosidade de referência (fórmula 31). O comprimento de rugosidade de referência neste caso é para o tipo de terreno classificado como II, ou seja, para áreas com vegetação rasa e obstáculos isolados.

$$K_r = 0,19 \cdot \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (\text{fórmula 31})$$

Onde:

K_r = fator de terreno para a norma Europeia, adimensional;

Z_0 = comprimento de rugosidade, em metros;

$Z_{0,II}$ = comprimento de rugosidade para terreno categoria II, em metros;

As categorias são divididas em cinco grupos e cada uma possui seu respectivo comprimento de rugosidade e altura mínima. As categorias, comprimento de rugosidade e altura mínima são descritas na tabela 9.

Tabela 9 – Categorias de terrenos segundo a norma Europeia.

Categoria	Descrição	Parâmetro	
		Z ₀	Z _{min}
0	Mar ou área de costas exposto a mar aberto	0,003	1
I	Lagos ou planícies e áreas horizontais com pouca vegetação e sem obstáculos	0,010	1
II	Área com baixa vegetação com grama e obstáculos isolados (árvores, construções) com separação de obstáculos maiores que 20 vezes a altura do obstáculo	0,050	2
III	Área com cobertura com vegetação regular, construções ou com obstáculos isolados com separação de no máximo 20 vezes a altura do obstáculo (vilas, terrenos suburbanos, florestas permanentes)	0,300	5
IV	Área na qual no mínimo 15% da superfície é coberta com construções e sua altura média exceda 15 m	1,000	10

(fonte: adaptado de CEN, 2010)

3.6.4 Fator topográfico

O fator topográfico é adotado quando a orografia (morros, taludes, montanhas) incrementa no mínimo 5% na velocidade do vento. Assim, os efeitos que contemplam a topografia do terreno devem ser considerados através do fator topográfico. Para terrenos onde a inclinação média é menor que 3% este fator pode ser desconsiderado sem qualquer ônus (CEN, 2010). Para morros e taludes isolados a velocidade do vento é dependente de sua declividade. A declividade é definida pela razão entre altura “d” e o comprimento horizontal do sopé do morro até o cume “L_u” definido pela figura 18.

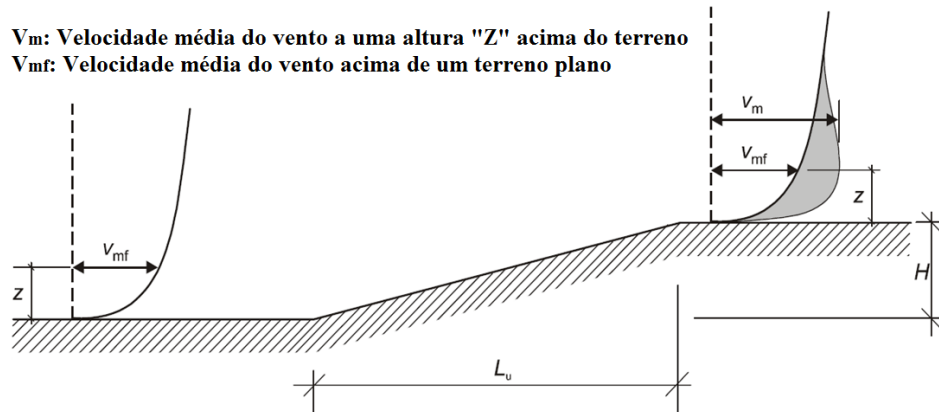


Figura 18 – Esquemática para a velocidade incremental de uma topografia segundo a norma Europeia (fonte: EUROCODE, 2010)

O maior incremento de velocidades do vento acontece no cume sendo determinada através do fator topográfico “ C_t ”. O fator topográfico é definido pela razão entre a velocidade média do vento na altura “ z ” acima do terreno, chamada de “ V_m ” pela velocidade média do vento acima do terreno plano “ V_{mf} ”, conforme fórmula 32.

$$C_t = \frac{V_m}{V_{mf}} \quad (\text{fórmula 32})$$

Onde:

c_t = fator topográfico para a norma Europeia, adimensional;

V_m = velocidade média do vento na altura “ z ” para a norma Europeia, em m/s;

V_{mf} = velocidade média do vento acima do terreno plano para a norma Europeia, em m/s.

O fator topográfico descrito acima explica o aumento da velocidade média do vento sobre morros e taludes isolados. Este fator está relacionado com a velocidade média no sopé do morro ou talude. Para descrever corretamente os efeitos da topografia, o valor da distância horizontal a partir do cume do morro ou talude “ X ” é função da distância horizontal do cume até o sopé do morro, conforme é descrito abaixo:

- a) morros e taludes, a barlavento, quando a declividade estiver entre 0,05 e 0,3 o valor de $|X| \leq \frac{L_u}{2}$
- b) morros, a sotavento:
 - i) quando a declividade $\theta \leq 0,3$ o valor de $|X| < \frac{L_u}{2}$;

- ii) quando a declividade $\theta \geq 0,3$ o valor de $|X| < 1,6d$
- c) taludes, a sotavento:
 - i) quando a declividade $\theta \leq 0,3$ o valor de $|X| < 1,5 L_e$;
 - ii) quando a declividade $\theta \geq 0,3$ o valor de $|X| < 5d$

Assim, o valor do fator topográfico é redefinido pelas fórmulas 33 e 34. Caso o ângulo for menor que 0,05 o $C_t = 1,0$.

$$C_t = 1 + 2 \cdot S_t \times \theta \quad \rightarrow \quad 0,05 < \theta < 0,3 \quad \text{(fórmula 33)}$$

$$c_t = 1 + 0,6 \cdot S_t \quad \rightarrow \quad \theta > 0,3 \quad \text{(fórmula 34)}$$

Onde:

c_t = fator topográfico para a norma Europeia, adimensional;

θ = declividade;

S_t = fator de localização topográfica para a norma Europeia, adimensional;

O fator de localização topográfica “ S_t ” é função dos comprimentos horizontais do cume até o sopé do morro “ L_u ”, do cume a quaisquer pontos à direita ou esquerda do cume “ X ”. e o comprimento horizontal efetivo “ L_e ”. As fórmulas 35 a 37 descrevem o cálculo do fator de localização topográfica. Quando a razão “ X/L_u ” estiver entre -1,5 e 0 e a razão “ Z/L_e ” estiver entre 0 e 2, incluindo os próprios valores, a formulação a ser seguida é descrita abaixo (fórmulas 35 a 37)

$$S_t = A \cdot e^{\left(\frac{B \cdot X}{L_u}\right)} \quad \text{(fórmula 35)}$$

$$A = 0,1552 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^4 - 0,8575 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^3 + 1,8133 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 - 1,9115 \left(\frac{Z}{L_e}\right) + 1,0124 \quad (\text{fórmula 36})$$

$$B = 0,3542 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 - 1,0577 \left(\frac{Z}{L_e}\right) + 2,6456 \quad (\text{fórmula 37})$$

Onde:

S_r = fator de localização topográfica;

A, B = parâmetros para a norma Europeia, adimensional;

X = comprimento horizontal a partir do topo do cume;

L_u = comprimento horizontal a partir do cume até o sopé do morro ou talude;

L_e = comprimento efetivo para a norma Europeia, em m.

Quando a razão “ X/L_u ” for menor que -1,5 ou a razão “ Z/L_e ” for maior que 2, deve-se utilizar o fator de localização topográfica igual a 0. O comprimento efetivo “ L_e ” é função do ângulo θ , para terrenos rasos: $0,05 < \theta < 0,3$, $L_e = L_u$; e para terrenos íngremes: $\theta > 0,3$, $L_e = d/0,3$.

3.7 NORMA JAPONESA: ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN – AIJ: RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINGS

A norma Japonesa determina o carregamento de vento de forma probabilístico-estatística, baseando-se no conceito de “equivalência estática de carga de vento”, da mesma forma que a Norma Brasileira. Esta norma avalia o máximo efeito de carregamento na estrutura devido à flutuação das forças do vento pelo método probabilístico-estatístico, calculando o efeito equivalente.

Diferentemente da Norma Brasileira a Japonesa introduz o efeito da direcionalidade do vento para o cálculo da velocidade do vento de projeto, ou característica. Além do efeito da direcionalidade, a velocidade básica também ajustada pelo fator topográfico, fator de exposição e pelo fator de conversão do período de retorno (AIJ, 2004).

3.7.1 Velocidade básica e de projeto do Vento

A velocidade básica do vento V_0 , em m/s, é a velocidade média do vento medida em um intervalo de tempo de 10 min, com um período de recorrência correspondente a 100 anos. A altura em que são realizadas as medições é de 10 m acima do terreno com uma orografia plana e aberta.

A velocidade de projeto ou característica V_k é a velocidade básica $V_{10,II}$ ajustada pelos fatores: direcionalidade do vento (K_D), perfil de velocidades do vento a uma altura (E_d) e pelo conversão do período de recorrência (K_{rW}). Este valor de V_k , geralmente, é maior que a V_0 e pode ser descrita pela fórmula 38.

$$V_P = V_{AIJ} \cdot K_D \cdot E_H \cdot K_{rW} \quad (\text{fórmula 38})$$

Onde:

V_{AIJ} = velocidade básica do vento para norma Japonesa, em m/s;

V_P = velocidade de projeto do vento para cada direção para norma Japonesa, em m/s;

K_D = fator de direcionalidade do vento para norma Japonesa, adimensional;

E_H = fator do perfil de velocidades do vento a uma altura d para norma Japonesa, adimensional;

K_{rW} = fator de conversão do período de recorrência para norma Japonesa, adimensional.

3.7.2 Fator de direcionalidade do vento

O fator de direcionalidade do vento K_D é responsável pelas características de direção do vento em condições extremas, as quais são influenciadas pela localização geográfica e topográfica.

Segundo a AIJ o fator de direcionalidade varia entre 0,85 a 1 e é considerada para 8 direções cardinais, conforme a localização considerada. Ao considerar o fator de direcionalidade é necessário que o local a ser analisado seja próximo das estações meteorológicas, visto que há um grande erro em locais afastados. Devido ao fato deste fator minimizar a velocidade, para fins conservadores e evitar equívocos é interessante utilizá-lo como $K_D = 1$.

3.7.3 Fator do perfil de velocidades do vento

O fator do perfil de velocidades do vento - E_d - considera o fator de exposição para terrenos planos e o fator topográfico no local considerado. Assim é definido conforme a fórmula 39:

$$E_H = E_r \cdot S_1 \quad (\text{fórmula 39})$$

Onde:

E_H = fator do perfil de velocidades do vento a uma altura d para norma Japonesa, adimensional;

E_r = fator de exposição para terrenos planos para norma Japonesa, adimensional;

S_1 = fator topográfico para norma Japonesa, adimensional.

3.7.3.1 Fator de exposição para terrenos planos

O fator de exposição para terrenos planos é classificado em 5 categorias diferentes, contemplando de terrenos abertos até muito rugosos. Para regiões onde há mudança de rugosidade, sendo essa mudança menor que quarenta vezes a altura “ d ” e a mais de 3 km de distância do local analisado, a norma especifica que o valor assumido é do terreno mais uniforme. O quadro 3 dispõe as categorias em função da condição do terreno.

Quadro 3 – Categorias em função da condição do terreno.

Categoria	Condição do terreno
I	Aberto, sem obstruções significantes, mar, lagos
II	Aberto, poucas obstruções, pastagens, campos de agricultura
III	Subúrbios, terrenos arborizados, poucas edificações pequenas
IV	Cidades, grandes edificações
V	Cidades, com grande concentração de grandes edificações

(fonte: AIJ, 2004)

O fator de exposição de terrenos planos é definido pela altura acima do terreno e por parâmetros, conforme fórmulas 40 e 41.

$$E_r = 1,7 \cdot \left(\frac{Z}{Z_G}\right)^\alpha \rightarrow Z_b < Z \leq Z_G \quad (\text{fórmula 40})$$

$$E_r = 1,7 \cdot \left(\frac{Z_b}{Z_G}\right)^\alpha \rightarrow Z \leq Z_b \quad (\text{fórmula 41})$$

Onde:

E_r = fator de exposição para terrenos planos para norma Japonesa, adimensional;

Z = altura acima do terreno, em m;

Z_b, Z_G, α = parâmetros para determinação de E_r para norma Japonesa, em metros. Os parâmetros são descritos na tabela 10 e dependem da categoria do terreno.

Tabela 10 – Parâmetros para determinação do fator de exposição segundo a norma Japonesa.

Categoria	I	II	III	IV	V
Zb	5	5	10	20	30
ZG	250	350	450	550	650
α	0,10	0,15	0,20	0,27	0,35

(fonte: AIJ, 2004)

3.7.3.2 Fator topográfico

O fator topográfico considera as mudanças de relevo na região. Estas mudanças ocorrem quando o escoamento passa por uma região com morros, taludes, montanhas, entre outros. Em consequência dos diferentes relevos ocorrem mudanças nas velocidades médias do vento (AIJ, 2004). Assim o S_1 é definido pela fórmula 42 e a inclinação do terreno é descrito pela fórmula 43.

$$S_1 = (C_1 - 1) \cdot \left[C_2 \cdot \left(\frac{Z}{d} - C_3 \right) + 1 \right]^{-C_2 \cdot \left(\frac{Z}{d} - C_3 \right)} + 1 \rightarrow S_1 \geq 1 \quad (\text{fórmula 42})$$

$$\theta = \frac{d}{2 \cdot L_s} \quad (\text{fórmula 43})$$

Onde:

S_1 = fator topográfico;

C_1, C_2, C_3 = parâmetros para determinação do fator topográfico, os quais dependem da inclinação do terreno para norma Japonesa, adimensional;

Z = altura acima do terreno;

d = altura do terreno;

L_s = distância horizontal considerada a $d/2$ para norma Japonesa, em metros;

θ = ângulo de inclinação do terreno, em graus.

Para inclinações menores que $7,5^\circ$ ou x/d não é necessário calcular o efeito topográfico, porém adota-se o valor 1. Se a inclinação do terreno (fórmula 43) for um ângulo maior que 60° , o valor assumido para os cálculos é 60° . A figura 19 esquematiza exatamente cada variável para o cálculo da inclinação do terreno para morros e taludes.

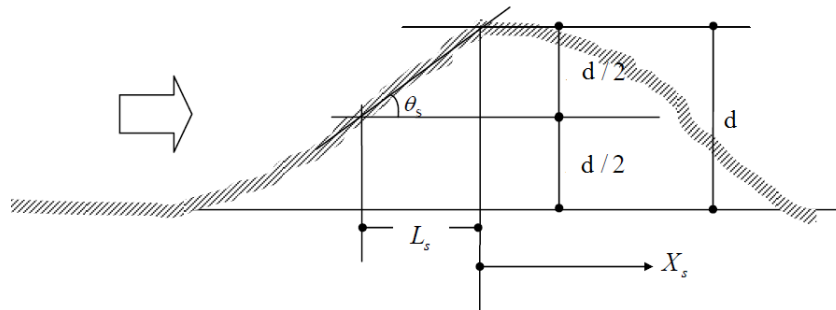


Figura 19 – Esquematização para morro segundo a norma Japonesa (fonte: AIJ, 2004)

Os parâmetros C_1, C_2 e C_3 variam conforme o ângulo e diferenciam-se para morros e para taludes (tabela 11). Para valores intermediários que não constam na tabela é necessário fazer interpolações.

Tabela 11 – Parâmetros para determinação do fator topográfico para morros segundo a norma Japonesa.

		Morros									
θs	Parâmetro	Xs/d									
		-4	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	2	4	8
7,5°	C1	1,1	1,2	1,35	1,35	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1
	C2	1	1	1	1	1,5	1,2	1,1	2	1,6	0
	C3	0	0	0	0	0,2	0,2	0,2	0,5	0,9	0
15°	C1	1	1,05	1,2	1,25	1,3	1,4	1,3	1,25	0,35	0,65
	C2	0	0	1	1	1	1,5	1,5	2	3	2
	C3	0	0	0	0	0	0,5	0,6	1,1	0,2	0,3
30°	C1	0,75	0,55	0,85	1	1,2	1,2	1,25	1,2	1,1	1,02
	C2	1,5	2	2	0	1	2	2	1,6	1,7	1,7
	C3	0	0	0	0	0	1,1	1,3	2,1	2,2	2,8
45°	C1	0,75	0,55	0,2	0,75	1,15	1,2	1,15	1,12	1,1	1,02
	C2	1,5	2	2	3	1	2,5	2,5	2	1,6	1,3
	C3	0	0	0	0	0	1,2	1,9	2,2	2,5	3,2
60°	C1	0,75	0,55	0,2	0,2	1,15	1,12	1,15	1,12	1,1	1,02
	C2	1,5	1,5	1,8	3	1	2,2	2,5	2	1,6	1,3
	C3	0	0	0	0	0	1,8	2	2,3	2,6	3,4

(fonte: AIJ, 2004)

3.8 MODELO ANALÍTICO: JACKSON E HUNT

A teoria de Jackson e Hunt tornou-se em meados da década de 70 um marco para a modelagem analítica do escoamento em morros. Muito antes desses pesquisadores terem grande relevância na literatura, pesquisadores como Scorer (1953), Scorer (1956), Corby e Wallington (1956), entre outros, já haviam estudado os efeitos da topografia no escoamento do vento, porém por meios como ensaios em túnel de vento e medições em campo.

No estudo realizado por Jackson e Hunt (1975), os autores propuseram uma solução analítica para um escoamento de vento sobre um morro bi-dimensional com pequena curvatura. O escoamento é de camada limite turbulenta e adiabática com uma rugosidade uniforme.

A velocidade, direção e turbulência do vento variam quando há um obstáculo ou uma topografia diferenciada, como por exemplo, vales, morros e taludes. Nessa época já tinha-se o entendimento que existia uma mudança de escoamento em relação a topografia, porém as mudanças não eram bem conhecidas (JACKSON; HUNT, 1975). Anterior ao trabalho de Jackson e Hunt (1975), Corby (1954) havia realizado um estudo envolvendo o escoamento do vento em morros. Neste trabalho foram avaliados os efeitos causados no perfil de velocidades quando o vento incide em morros.

No estudo de Jackson e Hunt (1975), os autores subdividem o escoamento em duas regiões distintas chamadas de camada interior e exterior, sendo que a camada interior compreende a

região da espessura da camada limite atmosférica (δ). Para escoamentos fora da zona separação, ou seja, $h/L \ll 1$ e $L/Z_0 \gg 1$ a velocidade média perturbada fora da camada interior ($Z > \delta$) pode ser aproximada pela teoria do escoamento potencial, já que há a presença de uma topografia no escoamento. A velocidade de referência depende de alguns fatores, dentre os quais o comprimento de rugosidade do terreno, a constante de Von Kármán ($\sim 0,4$), da velocidade de atrito e do comprimento característico do morro (fórmulas 44 e 45)

$$\Delta u(x, Z) = \frac{d}{L} \cdot \sigma_u(x, Z) \cdot u_0(L) \quad (\text{fórmula 44})$$

$$u_0(L) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{L}{Z_0}\right) \quad (\text{fórmula 45})$$

Onde:

$\Delta u(x, Z)$ = perturbação para velocidade média ou velocidade incremental devido a presença de morros em um altura Z acima do terreno e uma distância horizontal x a partir da crista, para o modelo de Jackson e Hunt;

d = altura do morro;

Z = altura acima do terreno;

L = distância horizontal a partir da crista;

x = posição de análise a partir da crista;

$\sigma_u(x, Z)$ = função de forma do morro, a qual depende da altura e da posição de análise em relação a crista, não depende da inclinação do morro, para o modelo de Jackson e Hunt;

$u_0(L)$ = velocidade de referência quando $Z=L$, para o modelo de Jackson e Hunt.

u_* = velocidade de atrito $\sim 0,35$;

κ = coeficiente de Von Kármán $\sim 0,4$;

Z_0 = comprimento de rugosidade do terreno para a região à barlavento do escoamento;

Parametrizando a formulação, os autores apresentaram algumas soluções analíticas para diferentes formas, porém este estudo limita-se aos morros em forma de sino. Morros com forma de sino (figura 20) apresentam uma formulação bem diferenciado do morro triangular. A fórmula 46 descreve a função de forma da topografia em análise, a qual considera as dimensões características da topografia.

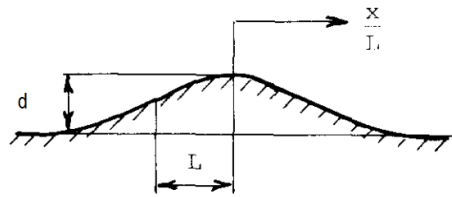


Figura 20 – Esquemática para morro em forma de sino segundo Jackson e Hunt (fonte: adaptado de BOWEN, 1983)

$$\sigma(x, Z) = \frac{\left[\left[1 + \left(\frac{Z}{L} \right)^2 \right] - \left[\left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \right]}{\left[\left[1 + \left(\frac{Z}{L} \right)^2 \right] + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right]^2} \quad (\text{fórmula 46})$$

Onde:

$\sigma(Z)$ = função de forma, para o modelo de Jackson e Hunt;

Z = altura acima do terreno;

L = distância horizontal a partir da crista;

x = posição de análise a partir da crista.

3.9 MODELO ANALÍTICO: LEMELIN, SURRY E DAVENPORT

O modelo de Lemelin, Surry e Davenport – LSD a fim de avaliar com mais acurácia os efeitos do vento em estruturas, quando expostos a condições topográficas adversas, desenvolveram um método simplificado. Este método consiste em estimar o aumento da velocidade, para um escoamento neutramente estratificado, em qualquer altura acima do nível do terreno e em qualquer direção do vento. Este método é aplicado para duas ou três dimensões de uma elevação, porém vale apenas para morros e taludes (LEMELIN et al., 1988).

Ao descrever o carregamento de vento em estruturas os autores descrevem através da pressão externa que age estaticamente à superfície, conforme fórmula 47.

$$W = q_z \cdot C_e \cdot C_p \cdot C_g \quad (\text{fórmula 47})$$

Onde:

W = pressão induzida pelo vento;

q_z = pressão de velocidade na altura de referência;

C_e = fator de exposição que define a variação da pressão de velocidade com a altura. Para terrenos planos este fator depende apenas da rugosidade do terreno;

C_p = coeficiente de pressão para o modelo LSD;

C_g = fator de efeito de rajada, para o modelo LSD.

Ao considerar o escoamento percolando por um morro ou talude o fator de exposição, segundo formulação apresentada pelos referidos autores, apresenta um cálculo diferenciado, sendo chamado de fator de exposição modificado. Assim, fica definido segundo a fórmula 48.

$$C_{em} = C_e(Z) \cdot (1 + \Delta V)^2 \quad (\text{fórmula 48})$$

Onde:

C_{em} = fator de exposição modificado para o modelo LSD;

$C_e(Z)$ = fator de exposição;

ΔV = velocidade incremental, para o modelo LSD.

A figura 21 apresenta esquematicamente os parâmetros e variáveis apresentados. A velocidade incremental pode ser aproximada por uma formulação simples (fórmula 49), a qual é referida como abordagem LSD.

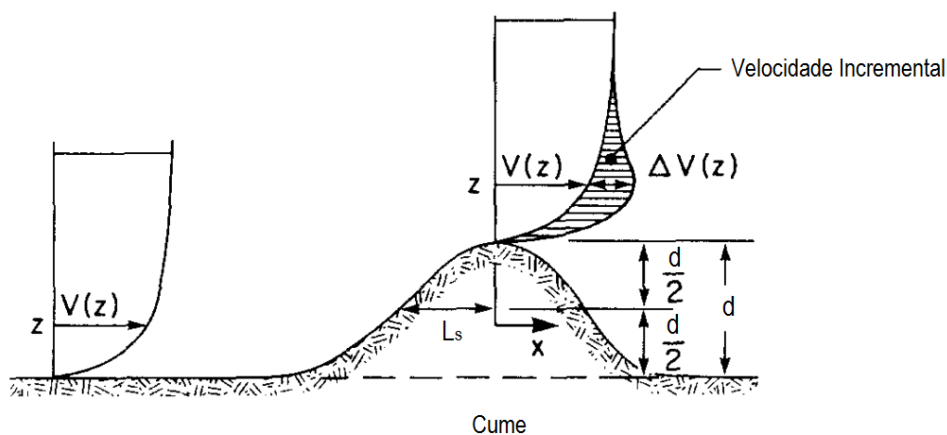


Figura 21 – Esquemática da velocidade incremental do vento em cumes e taludes segundo o modelo analítico de Lemelin Surry e Davenport. (fonte: adaptado de LEMELIN et al., 1988)

$$\Delta V(X, Z) = \Delta V_{m\acute{a}x} \cdot \left(\frac{1}{1 + 3 \cdot \left(\frac{X}{n \cdot L} \right)^p} \right)^2 \times \left(\frac{1}{1 + a \cdot \frac{Z}{L}} \right)^2 \quad (\text{f\acute{o}rmula 49})$$

Onde:

ΔV = velocidade incremental;

$\Delta V_{m\acute{a}x}$ = velocidade incremental m\acute{a}xima;

X = dist\ancia horizontal a partir do cume do morro at\e o ponto de interesse;

n = par\ametro, adimensional;

a = par\ametro, adimensional;

p = par\ametro, adimensional;

Z = cota acima do terreno;

L = dist\ancia horizontal medida a 50% da altura total do morro.

Os par\ametros de comprimento da f\ormula 50 s\ao definidos em um plano vertical que cont\em o vetor do vento a montante e o ponto de interesse na colina. Onde “X” \e definido como a dist\ancia horizontal do ponto mais alto do morro ao ponto de interesse. Na figura 22 s\ao definidos os par\ametros do modelo de Lemelin, Surry e Davenport.

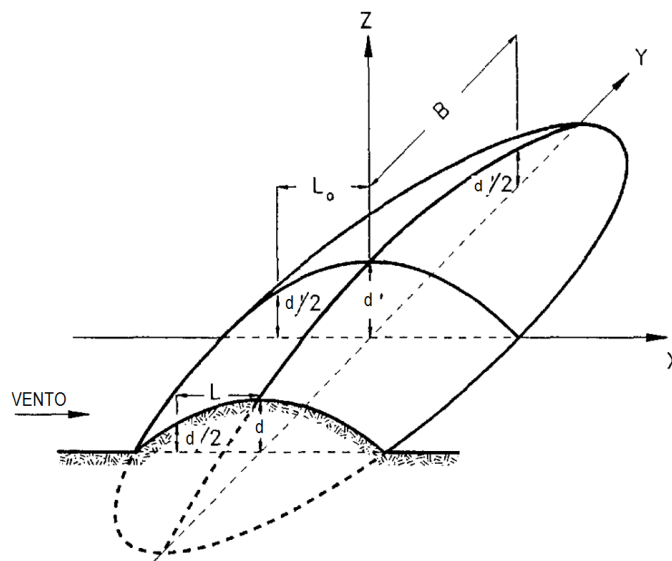


Figura 22 – Esquemática dos par\ametros do modelo analítico de Lemelin, Surry e Davenport. (fonte: adaptado de LEMELIN et al., 1988)

Para os valores do incremento máximo de velocidade os autores dividiram em dois grupos: Taludes 2D e o outro grupo é formado por morros 2D (ou vales com d negativo) e morros 3D. Serão descritas apenas as formulações para os modelos 2D e 3D para morros, visto que o objetivo do trabalho é apenas desenvolver o perfil de velocidades para morros. Para morros 2D e morros 3D, ou vales com altura negativa, os autores definiram o incremento máximo de velocidade conforme a fórmula 50. Os parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental são descritos na tabela 12.

$$\Delta V_{m\acute{a}x} = 2,3 \cdot G \cdot \left(\frac{\frac{B}{L_0}}{\frac{B}{L_0} + 0,4} \right) \quad (\text{f\acute{o}rmula 50})$$

Onde:

G = parâmetro, para o modelo LSD, adimensional;

B = distância horizontal entre o ponto mais alto da topografia até a metade de sua altura;

L_0 = distância horizontal entre o ponto mais alto da topografia até metade da altura, na direção ortogonal ao vento para o modelo LSD, em metros;

$\Delta V_{m\acute{a}x}$ = máxima velocidade incremental para o modelo LSD, em m/s.

Tabela 12– Parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental de morros 3D e cumes /vales 2D para o modelo LSD.

$\Phi=d/L$	G	L	a	n	p
$\leq 0,4$	Φ	d/Φ	2,0	2,0	2,0
$> 0,4$	0,4	2,5 d	2,0	2,0	2,0

(fonte: adaptado de LEMELIN et al., 1988)

Segundo Lemelin et al. (1988), o modelo pode ser empregado para morros regulares onde a variabilidade das irregularidades sejam pequenas, quando comparada com as dimensões globais. Neste estudo, os autores consideram que para morros mais íngremes a formulação é aproximada, visto que há uma grande probabilidade de separação do escoamento. Com a separação do escoamento há uma alteração na forma regular do morro, fazendo com que para regiões mais próximas do solo tenham uma redução de velocidades. Este modelo é válido para morros onde a superfície adjacente seja plana. Para superfícies com terrenos não-planos, onde o morro esteja inserido é imprescindível a escolha de parâmetros mais complexos, pois existem

diversas incertezas quanto ao escoamento. Sendo assim, o modelo passa a ser somente uma aproximação, sendo mais indicado o ensaio em túnel de vento (LEMELIN et al., 1988).

3.10 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS NORMAS

Na década de 70, aproximadamente, iniciou-se o desenvolvimento dos primeiros modelos empíricos para o cálculo do incremento de velocidade para terrenos não-planos. Um dos métodos mais conhecidos é o modelo analítico dos pesquisadores Jackson e Hunt (1975). Este modelo é um procedimento base para algumas normas existentes.

Para compararmos o efeito da topografia no perfil de velocidades do escoamento, basicamente, as normas citadas anteriormente, possuem um fator topográfico. Esse fator considera a forma do terreno, ou seja, suas dimensões horizontal e vertical. Porém, algumas normas, como por exemplo a Norma Brasileira, considera a inclinação média da topografia. Assim, com o objetivo de comparar os conceitos básicos dos modelos, esse breve estudo exemplifica e correlaciona as diferenças dos modelos. Para efeitos de comparação neste estudo os efeitos de direcionalidade, sazonalidade serão considerados neutros, ou seja, iguais a 1.

A velocidade básica ou de referência do vento, em todas as normas analisadas é uma velocidade cujos dados são obtidos a 10 m acima de um terreno plano, em uma exposição ou tipo de terreno aberto, sem obstruções. No quadro 4 pode ser observado os respectivos conceitos de cada norma.

Quadro 4 – Comparação entre as velocidades básicas.

Normas	Intervalo de Velocidade	Período de Retorno	Cota	Tipo de terreno
NBR 6123 (1988)	rajada 3s	50 anos	10 metros	campo aberto, plano
ASCE 7-10 (2010)	rajada 3s	50 anos	10 metros	campo aberto e plano com obstruções menores que ~ 9 m
AS/NZS 1170.2 (2011)	rajada 3s	$1 \leq R \leq 10.000$	10 metros	terreno aberto e plano
NBCC (2005)	média horária	50 anos	10 metros	terreno aberto e plano
EUROCODE 1 (2005)	média 10 min	50 anos	10 metros	terreno aberto e plano
AIJ (2004)	média 10 min	100 anos	10 metros	terreno aberto e plano

(fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2010); AIJ (2004))

O perfil de velocidades médio é descrito especificamente por três leis: lei logarítmica; lei de potência e a formulação de Deaves & Harris. Embora a lei logarítmica seja a mais apropriada matematicamente e a mais utilizadas pelos meteorologistas, é a lei de potência que é mais

utilizada pelos engenheiros do vento (KAREEM; TAMURA, 2013). A formulação proposta por Deaves & Harris é um modelo semi-empírico e é mais complicada em relação às demais. O organograma abaixo (figura 23) demonstra para cada norma o tipo de lei de perfil de velocidades.

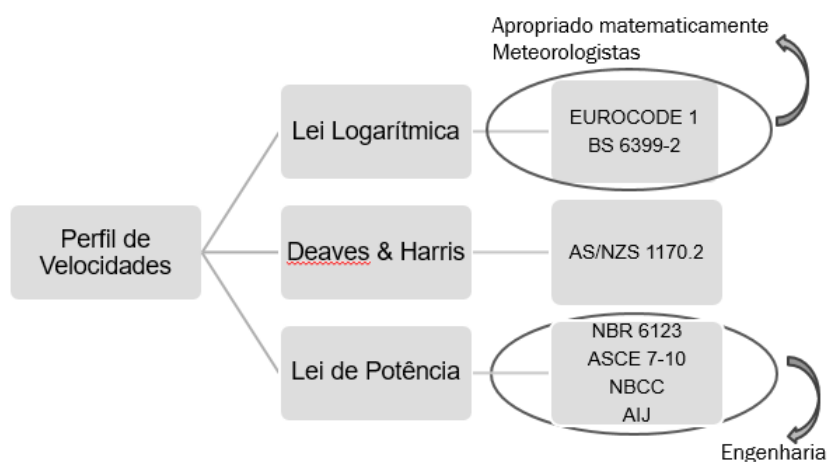


Figura 23 – Organograma do perfil de velocidades para as normas Brasileira, Americana, Australiana e Neozelandesa, Canadense, Européia e Japonesa (fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2010); AIJ (2004))

As categorias de exposição para as normas analisadas variam entre 3 e 5. As normas NBCC, ASCE 7-10 e BS 6399.2 dividem em 3 as categorias de exposição, já a AS/NZS 1170.2 apresenta 4 categorias, as normas NBR 6123, EUROCODE 1 e AIJ dividem em 5 as categorias (quadro 5). Quando comparadas entre si cada autor pode interpretar de uma maneira diferente, devido a subjetividade intrínseca da divisão das categorias.

Quadro 5 – Comparação entre categorias de exposição.

Tipo de ocupação	NBR 6123 (1988)	ASCE 7-10 (2010)	AS/NZS (2011)	NBCC (2005)	EUROCODE (2005)	AIJ (2004)
terreno aberto e plano, superfície lisa, mar	I	D	1	A	0	I
terreno aberto e plano, poucos obstáculos	II	C	2	A	I/II	II
terreno plano ou ondulado, edificações baixas e esparsas	III	C	2	B	II	III
terrenos com obstáculos numerosos	IV	B	3	B	III	IV
terrenos com obstáculos numerosos, altos e pouco espaçados	V	B	4	B	IV	V

(fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2010); AIJ (2004))

Em estudo realizado recentemente por Kwon e Kareem (2013), os autores realizam uma comparação entre diversas normas dentre as quais são citadas: ASCE, AIJ, AS/NZS, NBCC, EUROCODE. No estudo os autores criam uma nova escala de categorias de 1 a 6 (quadro 6), o que demonstra que cada pesquisador pode interpretar de uma maneira diferente a divisão entre as categorias.

Quadro 6 – Comparação entre categorias de exposição por Kwon e Kareem.

Tipo de ocupação	Sigla	ASCE (2010)	AS/NZS (2011)	NBCC (2005)	EUROCODE (2005)	AIJ (2004)
terrenos com obstáculos numerosos, altos e pouco espaçados	EC1	-	4	-	-	V
área urbana	EC2	A	-	C	IV	IV
área suburbana	EC3	B	3	B	III	III
terreno aberto onde a velocidade básica é definida	EC4	C	2	A	II	II
lagos abertos ou terrenos com poucas obstruções	EC5	D	1	-	I	I
área costeiras ou mar	EC6	-	-	-	0	-

(fonte: adaptado de KWON; KAREEM; 2013)

O comprimento de rugosidade “ Z_0 ”, para um mesmo tipo de terreno, é divergente entre as normas. Mesmo que os valores divirjam entre si a ordem de grandeza é muito próxima, o que implica em uma pequena diferença no valor. A tabela 13 demonstra os valores adotados pelas normas em análise.

Tabela 13 – Comparação entre o comprimento de rugosidade Z_0 das normas Brasileira, Americana, Australiana Neozelandesa, Canadense, Europeia e Japonesa.

Tipo de ocupação	NBR 6123 (1988)	ASCE 7-10 (2010)	AS/NZS (2011)	NBCC (2005)	EUROCODE (2005)	AIJ (2004)
terreno aberto e plano, superfície lisa, mar	0,005	0,005	0,002	Em termos de α	0,003	Em termos de α
terreno aberto e plano, poucos obstáculos	0,07	-	0,02	Em termos de α	0,01	Em termos de α
terreno plano ou ondulado, edificações baixas e esparsas	0,3	0,02	0,2	Em termos de α	0,05	Em termos de α
terrenos com obstáculos numerosos	1	0,3	-	Em termos de α	0,3	Em termos de α
terrenos com obstáculos numerosos, altos e pouco espaçados	2,5	-	2	-	1	Em termos de α

(fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2005); AIJ (2004))

Além dos pesquisadores Kwon e Kareem (2013), que pesquisaram as normas: ASCE 7-10 (2010), AIJ (2004), AS/NZS 1170.2 (2011), NBCC (2005), EUROCODE 1 (2005), os pesquisadores Stathopoulos, Zisis e Wang (2009) também fizeram um estudo com o uso de diferentes normas. As normas pesquisadas por eles são: ASCE 7-05 (2005), AS/NZS 1170.2 (2002), NBCC (2005) e BS 6399-2 (1997). Para Stathopoulos, Zisis e Wang (2009), que dividiram apenas em 4 categorias de exposição, os valores de comprimentos de rugosidade são iguais aos apresentados na tabela 14.

Outra diferença relevante entre as normas é a abrangência da inclinação, ou seja, o limite inferior e superior dos ângulos de inclinação (tabela 14). A inclinação mínima é responsável pela identificação dos efeitos da velocidade incremental de vento, já a inclinação máxima corresponde ao limite onde a partir disso é formada a zona de separação. A norma Japonesa é a mais abrangente. Já para as normas canadense e americana a variação é de apenas 15%.

Tabela 14 – Comparação entre abrangência de inclinações das normas Brasileira, Americana, Australiana Neozelandesa, Canadense, Europeia e Japonesa.

Limites de Abrangência da Inclinação do Terreno			
Normas	Limite inferior	Limite superior	Δ
NBR 6123 (1988)	5%	100%	95%
ASCE 7-10 (2010)	10%	25%	15%
AS/NZS (2011)	5%	45%	40%
NBCC (2010)	10%	25%	15%
EUROCODE (2010)	5%	30%	25%
AIJ (2004)	13%	173%	160%

(fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2005); AIJ (2004))

A topografia do terreno também tem influência na área de abrangência horizontal para o incremento da velocidade. Assim como outros parâmetros analisados este possui divergências entre as normas citadas. Estudos de Ngo e Letchford (2008), analisaram a área horizontal que recebia a influência dos efeitos da velocidade incremental. As normas analisadas foram: ASCE 7-05 (2005), AS/NZS 1170.2 (2002), AIJ (2004) e EUROCODE 1 (2002), na tabela 15 pode-se observar os valores.

Tabela 15 – Comparação entre a área de abrangência horizontal das normas Americana, Australiana Neozelandesa, Europeia e Japonesa.

NORMAS	Cumes de morros				Taludes			
	Raso		Íngreme		Raso		Íngreme	
	Barlavento	Sotavento	Barlavento	Sotavento	Barlavento	Sotavento	Barlavento	Sotavento
ASCE 7-05 (2005)	2,0 d (1,0 Lh)	2,0 d (4,0)	2,0 d (1,0 Lh)	8,0 d	2,0 d (1,0 Lh)	2,0 d (1,0 Lh)	2,0 d (1,0 Lh)	2,0 d (1,0 Lh)
AS/NZS 1170.2 (2002)	1,6 d (1,4 Lh)	4,0 d	1,6 d	4,0 d	1,6 d (1,4 Lh)	1,6 d (1,4 Lh)	1,6 d	1,6 d
EUROCODE 1 (2002)	1,7 d (1,0 Lh)	5,0 d (3,0 Lh)	1,7 d	5,0 d	1,7 d (1,0 Lh)	1,7 d (0,5 Ld)	1,7 d	1,6 d
AIJ (2004)	4,0 d	8,0 d	4,0 d	8,0 d	4,0 d	8,0 d	4,0 d	8,0 d

(fonte: adaptado de NGO; LETCHFORD; 2008)

No que tange as alturas máximas e mínimas apenas as normas brasileira, americana, européia e Japonesa adotam valores. As normas australiana e neozelandesa e canadense não explicitam valores, conforme pode ser observado na tabela 16.

Tabela 16 – Comparação entre valores máximos e mínimos da altura acima do terreno.

Tipo de ocupação	Limites	NBR 6123 (1988)	ASCE 7-10 (2010)	AS/NZS (2011)	NBCC (2005)	EUROCODE (2005)	AIJ (2004)
terreno aberto e plano, superfície lisa, mar	Inferior (Z _{min})	-	2,13	-	-	1	5
	Superior (Z _g)	250	213,36	-	-	200	250
terreno aberto e plano, poucos obstáculos	Inferior (Z _{min})	-	-	-	-	1	5
	Superior (Z _g)	300	-	-	-	200	350
terreno plano ou ondulado, edificações baixas e esparsas	Inferior (Z _{min})	-	4,57	-	-	2	10
	Superior (Z _g)	350	274,32	-	-	200	450
terrenos com obstáculos numerosos	Inferior (Z _{min})	-	9,14	-	-	5	20
	Superior (Z _g)	420	365,76	-	-	200	550
terrenos com obstáculos numerosos, altos e pouco espaçados	Inferior (Z _{min})	-	-	-	-	10	30
	Superior (Z _g)	500	-	-	-	200	650

(fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2010); AIJ (2004))

Ao comparar as normas supracitadas é perceptível que cada norma tem um método de cálculo e parâmetros específicos. Além disso, alguns parâmetros têm sua base desenvolvida para o país de vigência, com suas peculiaridades de incidência de vento. Por isso ao comparar as normas, primeiramente, é necessário ter bom senso e levar em consideração parâmetros que são abordados em todas as normas, como é o caso do fator topográfico. Parâmetros, como por exemplo, efeito de direcionalidade e sazonalidade não são abordados em todas normas, principalmente na NBR 6123 que não considera esses efeitos. Logo, são considerados iguais a 1 para fins de comparação.

4 METODOLOGIA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TÚNEL DE VENTO

Este capítulo aborda toda a técnica utilizada em túnel de vento, desde a fabricação dos modelos que serão ensaiados até os métodos de aquisição de dados. Além disso, serão abordadas as técnicas de simulação de modelos reduzidos.

4.1 INTRODUÇÃO

Os ensaios experimentais em túnel de vento são ferramentas importantes para análise do comportamento do vento. Através de modelos reduzidos tem-se uma reprodução idêntica ou, por assim dizer, fiel ao comportamento encontrado em campo. Os modelos reduzidos têm a capacidade de reproduzir fielmente a estrutura a ser analisada, bem como o seu entorno, como por exemplo: vegetação e topografia. É de fundamental importância que a topografia esteja inserida no modelo reduzido, pois sabe-se que ela influencia diretamente o perfil de velocidades do vento.

Os túneis de vento possuem basicamente, duas configurações de seção de teste: circuito aberto ou fechado. Esses túneis podem ser de baixa velocidade ou de ventos transônicos. No entanto existem inúmeras variações nas características de cada túnel, fazendo com que se obtenha túneis para várias aplicações na engenharia. Assim, pode-se citar túneis: aeronáuticos, automotivos, aeroacústicos, meio ambiente, entre outros. O túnel descrito por Barlow, Rae e Pope como sendo túnel de vento de meio ambiente é mais conhecido como túnel de vento de camada limite. Os túneis de vento de camada limite são túneis de vento projetados para simular a camada limite atmosférica. São costumeiramente utilizados para o carregamento de ventos em edificações, dispersão de poluentes, efeito de vizinhança, entre outras. Diferentemente, de túneis para aplicações automobilísticas, o escoamento não é reto e liso e sim variável. Como as características da camada limite variam com o terreno, esse por sua vez, deve se adaptar (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

Os túneis de vento de camada limite podem ser divididos em dois grupos: circuito aberto ou fechado. O túnel de vento de circuito aberto é a configuração mais simples que pode-se construir. Esta configuração de túnel permite apenas uma mesa de ensaios, por ser mais curto e ser influenciado por agentes externos. O fluido é injetado no circuito por um dos lados e

absorvido por outro, apesar disto é um túnel que apresenta bons resultados, uma das vantagens deste circuito é o menor custo de construção. O túnel de circuito fechado, por não ser influenciado por circulação externa, apresenta um escoamento mais comportado e controlado. Além disso, é mais eficiente que o túnel de circuito aberto, neste circuito pode ser incorporado diversas mesas de ensaios com diferentes características (HOLMES, 2001).

Na investigação do escoamento em torno de uma topografia irregular, como por exemplo, morros e taludes, é importante que as características físicas sejam reproduzidas consoante ao que é encontrado na natureza. Assim, pode-se garantir que os perfis de velocidade e intensidade de turbulência são coerentes. Para tanto, o túnel de vento deverá ser de camada limite. Nos estudos de Takahashi em 2002, o autor além de manter as propriedades físicas coerentes, observou 3 diferentes tipos de estabilidade do escoamento atmosférico: instável, neutro e estável. Neste estudo a temperatura no túnel de vento também foi controlada, eliminando assim uma possível variável, já que a temperatura também interfere no escoamento (TAKAHASHI, T et al., 2002).

Uma das propriedades físicas de fundamental importância para um escoamento corresponde a camada limite atmosférica é a rugosidade. Quando o escoamento é sobre um morro ou talude, a importância deste fator também é relevante. Nos estudos de Cao e Tamura (2006), os autores compararam diversos modelos reduzidos em túnel de vento, sendo uma das variáveis a rugosidade do terreno. Como conclusão é notável que quando há rugosidade no terreno e também no morro, as velocidades incrementais no topo do morro são maiores do que um terreno não rugoso.

4.2 TEORIA DA SEMELHANÇA

A simulação em túnel de vento requer algumas condições de semelhança. Isto é necessário, para que se possa reproduzir em túnel de vento as mesmas condições que são encontradas na natureza. Para tanto, é imprescindível que a semelhança física a qual engloba as semelhanças: geométrica, dinâmica e cinemática sejam cumpridas.

A semelhança geométrica ocorre quando dois objetos são geometricamente semelhantes, ou seja, mesmo formato, porém com medidas proporcionais. Além disso, as condições a que esse está inserido também devem ser semelhantes à realidade, como por exemplo, a rugosidade, topografia, vegetação e detalhes dos objetos analisados. A semelhança cinética é aquela que

traduz o movimento dos corpos, sem preocupar-se com as forças que induziram o movimento. Assim, nesse caso é necessário que as medidas de comprimento e tempo sejam proporcionais entre a estrutura real e o modelo reduzido. A semelhança cinética pode ser entendida “[...] como uma semelhança geométrica dos escoamentos. A distribuição de velocidade médias e as características da turbulência devem ser análogas nos dois escoamentos.”. A semelhança dinâmica é aquela que traduz o movimento do corpo, preocupando-se com as forças que induziram o elemento ao movimento. Para tanto, é necessário que as relações de força sejam proporcionais entre a estrutura real e o modelo reduzido (BLESSMANN, 2011).

As semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica, acima descritas, devem ser proporcionais entre estrutura real e modelo reduzido. Para o estudo em topografia só serão analisadas as semelhanças geométrica e cinética. Dentre as relações podemos citar: escala de comprimento, tempo e velocidades, as quais são descritas a seguir:

O fator de escala de comprimento (fórmula 51), é a relação entre o comprimento do modelo reduzido e o seu comprimento correspondente na estrutura real.

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (\text{fórmula 51})$$

O fator de escala de tempo é dado pela inversão do fator de escala de frequência (fórmula 52).

$$\lambda_T = \frac{1}{\lambda_f} \quad (\text{fórmula 52})$$

O fator de escala de velocidade é dado pela razão entre a velocidade do modelo e a velocidade da estrutura real (fórmula 53). Esse fator também pode ser calculado através do produto entre os fatores de comprimento e de frequência.

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{L_m}{t_m}}{\frac{L_p}{t_p}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} = \lambda_L \cdot \lambda_f \quad (\text{fórmula 53})$$

Onde:

λ_v = fator de escala de velocidades;

λ_f = fator de escala de frequência;

λ_L = fator de escala de comprimento;

L_m = comprimento do modelo;

L_p = comprimento do protótipo;

λ_T = fator de escala de tempo;

V_m = velocidade do modelo;

V_p = velocidade do protótipo.

4.3 REPRODUÇÃO DA CAMADA LIMITE

A camada limite atmosférica, assim como a semelhança entre o objeto e seu protótipo devem ser fiéis ao meio real. Para ser reproduzida em túnel de vento, a camada limite é gerada por alguns dispositivos: rugosidade, barreiras e dispositivos mistos. Ao se realizar um ensaio em túnel de vento, a rugosidade da superfície tem fundamental importância para que as condições reais sejam reproduzidas corretamente no ensaio experimental. A rugosidade tem um papel importante, pois estabelece um perfil de tensões de Reynolds através da camada. Esse por sua vez, tem a capacidade de controlar as características do vento, como por exemplo, o perfil de velocidade e as características de turbulência do escoamento. A rugosidade superficial é a componente mais importante, pois é a partir dessa que se estabelece três parâmetros da lei logarítmica. Os parâmetros que são obtidos através da rugosidade são: deslocamento do plano zero, velocidade de atrito, e o comprimento de rugosidade aerodinâmico (COOK, 1978).

O dispositivo de barreiras corresponde a parte artificial da simulação em túnel de vento. “A barreira fornece um déficit de quantidade de movimento ao nível do piso e também altura a camada limite, a qual é misturada com a simulação sendo desenvolvida pelo dispositivo de mistura.”(LOREDO-SOUZA et al., 2004).

Segundo Blessmann (2011), o dispositivo de barreiras pode ser implementado por meio de diferentes formas, dentre os quais pode-se citar:

- a) tela uniforme: turbulência fina sobreposta a uma corrente de ar uniforme;
- b) telas curvas e planas: para obtenção de perfis de velocidades médias e turbulência fina;
- c) barras finas com seção circular (pode haver variação de diâmetro e espaçamento): para obtenção de perfis de velocidades médias e turbulência fina;
- d) triângulos (diversas dimensões, inteiros ou vazados, de lados retos ou curvos): para obtenção de perfis de velocidades médias e turbulência;
- e) grelha malha quadrada ou retangular (constituída de barra de seção retangular): turbulência sobreposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;
- f) grelha única de malha variável ou grelhas sobreposta a uma corrente de ar uniforme
- g) grelha de barras horizontais de seção retangular ou circular (espessura e espaçamento variáveis) obtenção do perfil de velocidade média e turbulência média.

As formas acima citadas, possuem em comum a característica de empregarem corpos sólidos para reproduzir as características do vento. Em consequência disso, todos os métodos tendem a reduzir a velocidade média obtida no túnel de vento (BLESSMANN, 2011).

O dispositivo de mistura, assim como os dispositivos de barreiras, também é considerado um método artificial. Este método é composto por meios aerodinâmicos, cujo objetivo é formar a estrutura do vento natural. Para que isso ocorra, é necessário que jatos direcionais sejam lançados perpendicularmente ao escoamento. Além disso, pode-se lançar jatos múltiplos direcionais com intensidade variável (BLESSMANN, 1982). O método de dispositivos de mistura não causa redução da velocidade média do vento, diferentemente dos dispositivos de rugosidade e barreira. Ao contrário, devido a quantidade de movimento adicionada ao escoamento longitudinal a velocidade é aumentada. Com a utilização deste método, em comparação com os supracitados, o ensaio pode ser melhor controlado em relação às características do vento, através de controles de vazão do ar (BLESSMANN, 2011).

Os dispositivos acima citados variam de diferentes formas, seja pelas dimensões dos próprios dispositivos ou pelas distâncias que esses estão em relação ao elemento a ser analisado. Geralmente, estes dispositivos são utilizados em conjunto para a formação do escoamento mais próximo a realidade. Eles, geralmente, possuem interação entre si, influenciando na formação

da camada limite atmosférica (LOREDO-SOUZA, 2004). Na figura 24 pode ser observada os dispositivos acima citados para a formação da camada limite atmosférica.

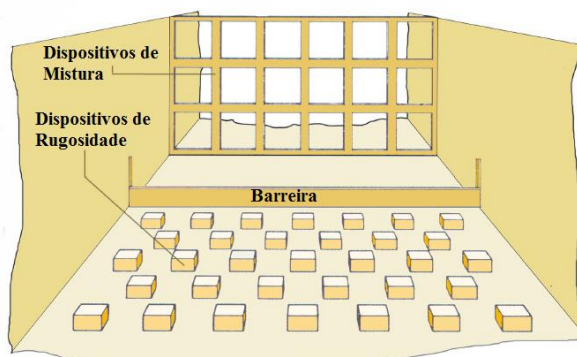


Figura 24 – Esquema de dispositivos para formação da camada limite atmosférica (fonte: COOK, 1973)

4.4 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN

Os ensaios experimentais desta pesquisa foram realizados no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, situado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este túnel tem configuração de circuito fechado e podem ser realizados ensaios experimentais estáticos e dinâmicos para modelos reduzidos de edificações da construção civil. O túnel de vento Professor Joaquim Blessmann pode reproduzir velocidade de vento até 45 m/s, com escoamento uniforme e suave sem a presença de modelos em seu interior, reproduzindo a camada limite atmosférica. Estes ventos são reproduzidos em uma parte do túnel onde são desenvolvidas altas velocidade. Tem relação comprimento/altura da câmara principal de 10,3 e dimensões de 130/90/932 cm (largura/altura/comprimento). Para o funcionamento o túnel possui um motor elétrico de 100 HP de potência, que aciona as hélices do ventilador e assim fazem o ar circular. A velocidade do escoamento é controlada a partir de um dispositivo inversor de frequências (BLESSMANN, 2011).

Para a realização dos ensaios experimentais o túnel de vento dispõe de quatro mesas giratórias para fixação dos modelos, as quais podem ser visualizadas na figura 25, cujas as dimensões estão em cm. Para a execução dos ensaios experimentais deste trabalho será utilizada a mesa II. Nesta mesa é possível obter o perfil de velocidades desejado, considerando medições a barlavento, no cume e a sotavento do morro. Cada mesa possui aplicações específicas que serão descritas nas alíneas abaixo:

- a) Mesa M-I: utilizada para ensaios do tipo aeronáutico no piso do túnel, pesquisa básica em formas geométricas simplificadas 2D ou 3D. Ensaios para construção civil com geradores de turbulência colocados na câmara de simuladores;
- b) Mesa M-II: utilizada para ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel, ensaia-se também modelos reduzidos de construção civil, com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores e/ou outras seções. Nesta mesa também são realizados estudos de instabilidade aerodinâmica com modelos 2D colocados na horizontal, sendo que o modelo pode ser colocado na horizontal ou vertical;
- c) Mesa M-III: utilizada, especialmente, para ensaios dinâmicos em estruturas com altura significativa;
- d) Mesa M-IV: fica localizada no retorno do túnel, cuja seção transversal é de 240/210 cm, é utilizada para ensaios de dissipação de poluentes, topografia, modelos de pontes, entre outros (BLESSMANN, 2011).

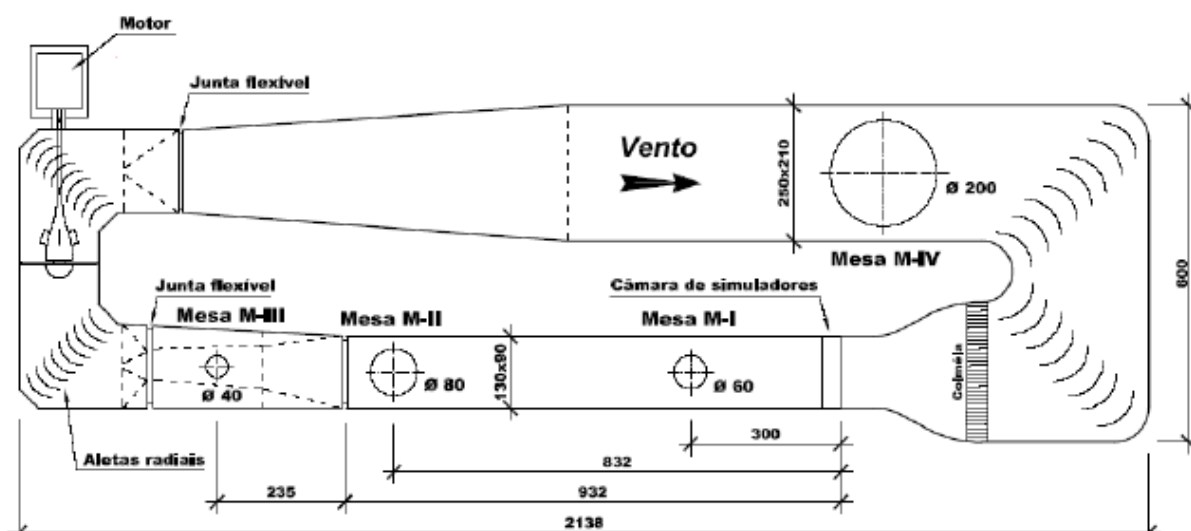


Figura 25 – Esquema das mesas do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann (fonte:BLESSMANN, 2011)

4.4.1 Simulação do vento natural

O vento simulado para realizar os ensaios experimentais em túnel de vento é do tipo deslizante e turbulento. O perfil de velocidades médias, a qual reproduz a variação vertical da velocidade média do vento em uma seção do túnel, pode ser descrito através da lei de potências (fórmula 54).

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{fórmula 54})$$

Onde:

$V(z)$ = velocidade média na cota z ;

V_{ref} = velocidade de referência na cota 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 curva de potência.

O valor obtido para o expoente p da fórmula 65 que corresponde à categoria I da Norma Brasileira NBR 6123 é igual a 0,11. Para esta categoria, o terreno contempla superfícies lisas com grandes dimensões e mais de 5 km de extensão (sentido do vento incidente), como por exemplo: mar calmo, lagos, rios. Além deste valor, também será utilizado o valor do expoente igual a 0,23. Este expoente corresponde a uma categoria mista, abrangendo as categorias III e IV da NBR 6123. A categoria III abrange terrenos planos ou ondulados com obstáculos, como por exemplo: sebes, muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações de pequena altura, subúrbios longe de grandes centros. A categoria IV abrange terrenos cobertos por muitos obstáculos, com grande altura e próximos, como por exemplo: zonas florestais, parques, bosques, subúrbios com muitas construções, pequenas cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas (ABNT, 1988). As figuras 26 e 27 mostram as principais características do vento simulado, tais como: perfil vertical de velocidades média normalizada e intensidade de turbulência local, normalizados na cota de 450 mm.

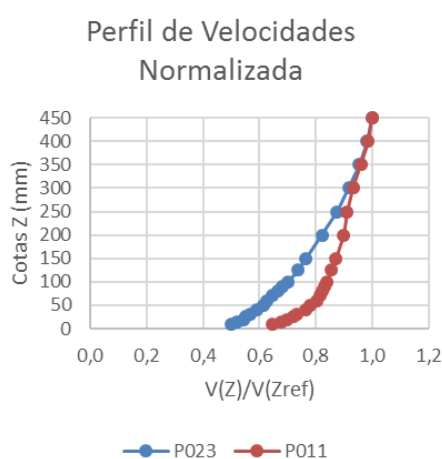


Figura 26 – Perfil de velocidades médias normalizadas para vento com expoente da lei de potência expoente da lei de potência $p=0,11$ e $0,23$.

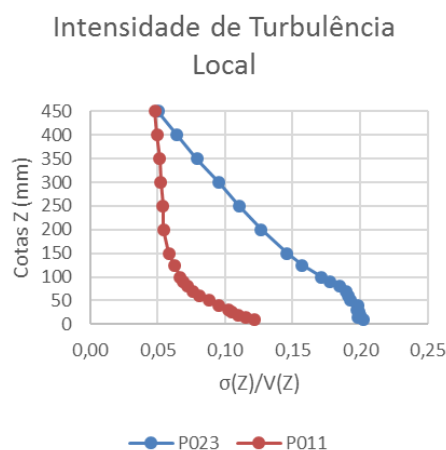


Figura 27 – Intensidade de turbulência local para vento com expoente da lei de potência expoente da lei de potência $p=0,11$ e $0,23$.

4.4.2 Aquisição de dados

A aquisição de dados foi realizada por meio do anemômetro do fabricante *Dantec Dynamics*, do Sistema *Streamline 90 NS*, que opera com temperatura constante. Neste estudo foram acoplados ao sistema um módulo de fio quente e um calibrador de sonda automático. O sistema também possui entrada para aquisição de dados da temperatura do escoamento. Para registrar o sinal é utilizado uma sonda de fio quente, onde os dados são adquiridos pelo programa *Stream Ware*, do mesmo fabricante. A frequência de aquisição dos dados é de 2,048 kHz e o período é de 60 s, o número de valores obtidos nessa frequência é 122880. Para se obter as diferenças de temperatura média no interior do túnel e a diferença de pressão utilizou-se o equipamento *ManoAir 500*. A diferença de pressão é obtida entre os anéis piezométricos que estão situados na entrada do túnel de vento.

4.5 MODELOS REDUZIDOS

Os ensaios experimentais foram realizados por meio de modelos reduzidos. A organização dos experimentos é dividida em: modelos reduzidos hipotéticos e modelo reduzido de uma topografia real. Para os modelos reduzidos hipotéticos foram confeccionados 8 modelos: 4 modelos 2D e 4 modelos 3D. As inclinações dos modelos reduzidos são: 13° , 20° , 35° e 45° ; todos com altura de 150 mm e escala de 1:1000. Os dados obtidos foram analisados para três pontos: “A” (barlavento), “B” (centro) e “C” (sotavento).

O modelo reduzido de um morro real, é a reprodução de uma área complexa real, onde possui um morro assimétrico principal e vários outros morros secundários. As medições foram

realizadas para quatro ângulos de incidência a partir do Norte: 10°, 200°, 288° e 327°; foram analisados dois pontos: ponto “A” e “B”. A escala desse modelo é 1:600 e o vento possui expoente para a lei de potência igual a $p=0,23$. A figura 28 apresenta um organograma organizando os modelos com os parâmetros utilizados.

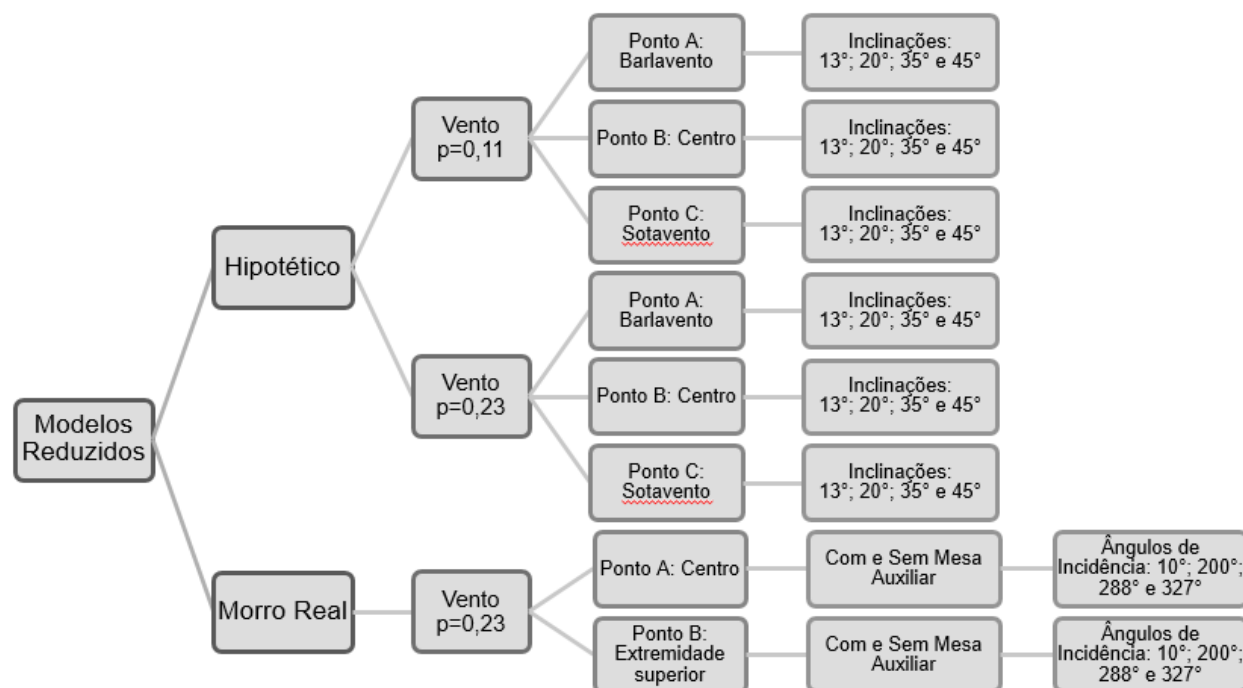


Figura 28 – Organograma da organização dos modelos reduzidos experimentais.

4.5.1 Modelos reduzidos hipotéticos

Os modelos reduzidos hipotéticos, tem como princípio um modelo idealizado de estrutura, nesse caso um morro simétrico e com inclinação constante. Neste estudo foram desenvolvidos modelos 2D e 3D para 4 ângulos distintos: 13°, 20°, 35° e 45° e escala de 1:1000. A forma dos modelos foi desenvolvida a partir dos modelos de Ferreira et al. (1995). As figuras 35 a 38 mostram a planta baixa dos modelos 2D e 3D, a vista lateral e o posicionamento dos pontos de medição, para os modelos 13°, 20°, 35° e 45°, respectivamente.

O perfil de velocidades foi investigado por meio de 3 pontos: barlavento (ponto A), centro (ponto B) e sotavento (ponto C), conforme destacado em cada modelo nas figuras 29 a 32. Para cada ponto foram realizadas 20 cotas acima do terreno em análise, as quais, em metros, são: 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 mm. A velocidade média de cada cota foi obtida no intervalo de 60 s. Para compor o perfil de velocidade para a categoria I o expoente da lei de potência é igual a $p = 0,11$, utilizou-se também

o expoente da lei de potência é igual a $p = 0,23$ o que corresponde as categorias III e IV da NBR 6123.

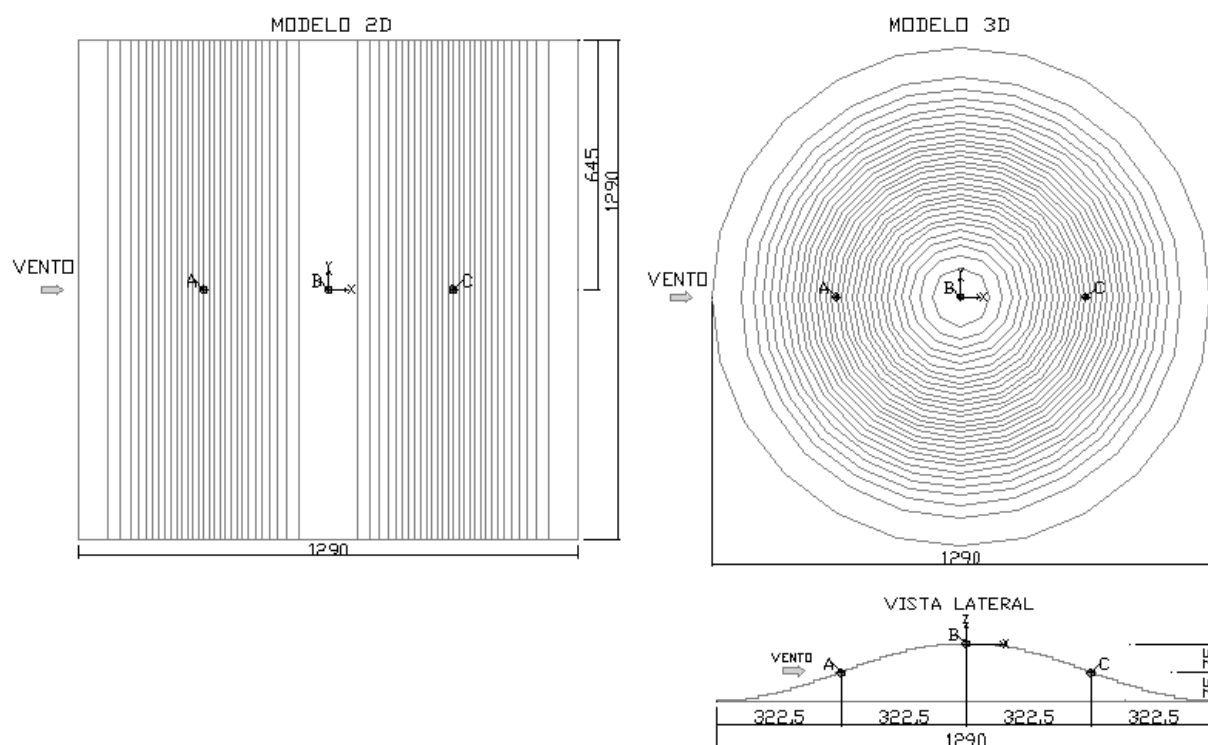


Figura 29 – Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 13°.

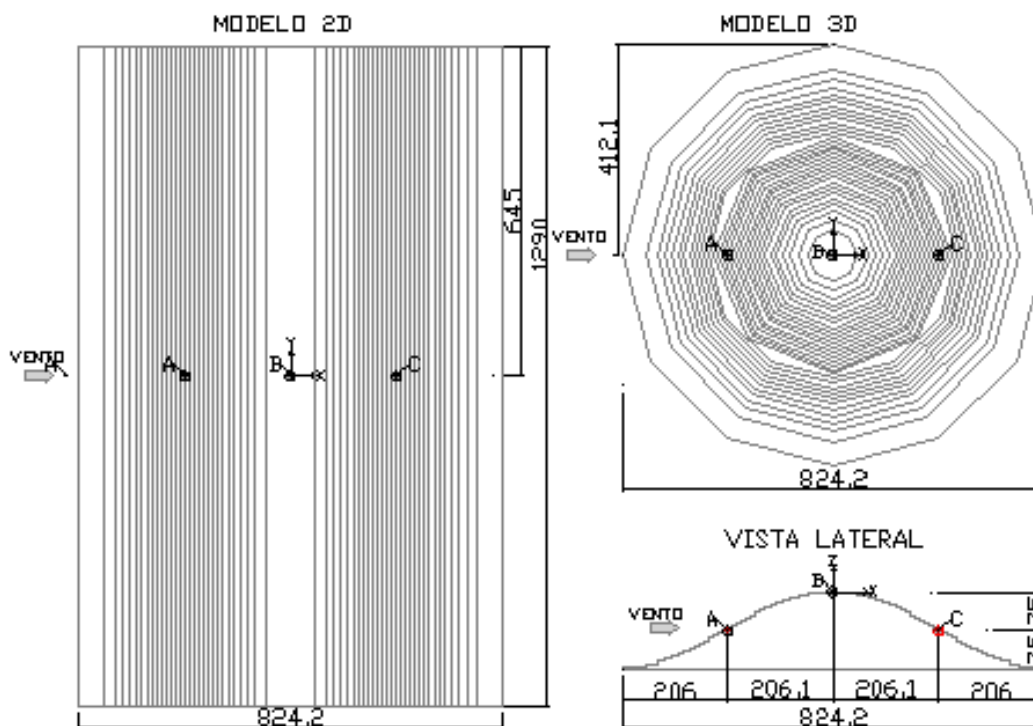


Figura 30 – Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 20°.

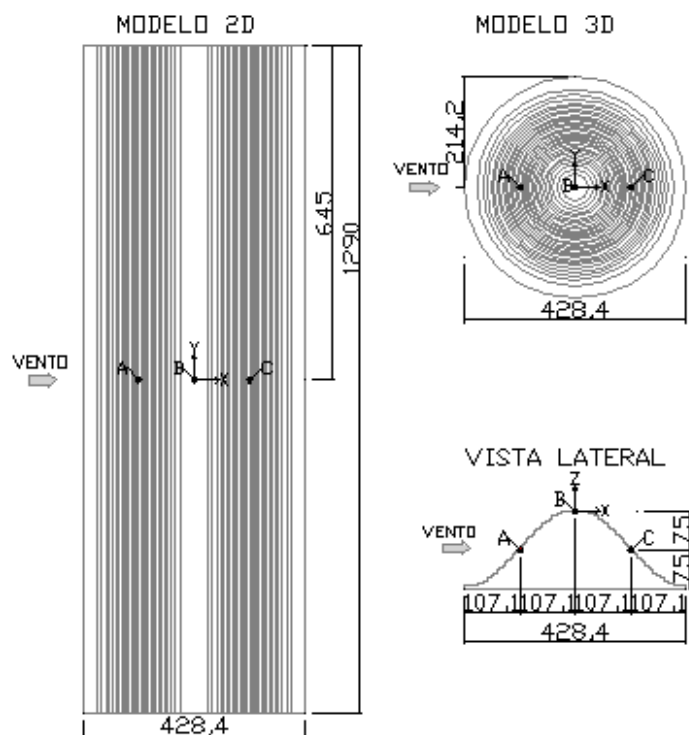


Figura 31 – Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 35°.

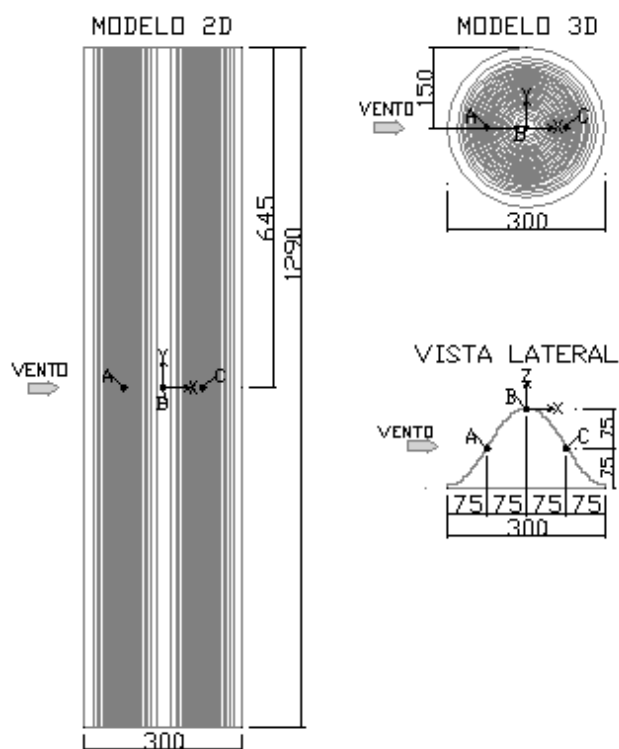


Figura 32 – Planta baixa 2D e 3D, vista lateral do modelo reduzido hipotético 45°.

Os modelos reduzidos utilizados na pesquisa foram executados na oficina do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC-UFRGS). Para confeccionar os modelos foram utilizadas placas de isopor de 5 mm de espessura, coladas entre si com cola branca extra. As figuras 33 e 34 mostram os modelos para o ângulo de 45° finalizados no túnel de vento, prontos para serem ensaiados.



Figura 33 – Vista lateral do modelo reduzido hipotético 2D para ângulo 45°.



Figura 34 – Vista lateral do modelo reduzido hipotético 3D para ângulo 45°.

4.5.2 Modelo reduzido de um morro real

O modelo reduzido de um morro real do morro está inserido em uma área complexa e todo conjunto foi reproduzido em uma escala de 1:600. A rugosidade do terreno também foi reproduzida conforme a existente no local, que corresponde ao vento com expoente da lei de potência igual a $p = 0,23$. A variação da velocidade do escoamento pela presença do morro foi avaliada através de dois pontos na mesma direção, para quatro direções distintas. Assim os ângulos de incidência do vento foram, 10°, 200°, 288° e 327° a partir do Norte, conforme figura 35. Para cada ponto analisado eram obtidas 25 cotas acima do terreno: 4,2, 7,2, 10,2, 13,2, 16,2, 19,2, 23,7, 28,2, 32,7, 37,2, 41,7, 48, 54, 60, 66, 72, 87, 102, 117, 132, 147, 162, 177, 192, e 207 mm.

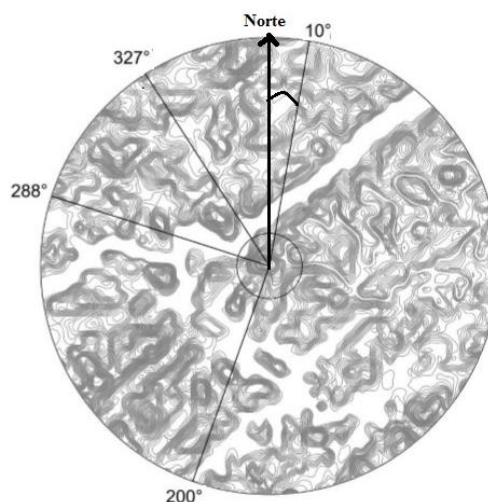


Figura 35 – Localização dos ângulos de incidência do vento adotados para o modelo reduzido real.

Os pontos os quais foram obtidos os perfis de velocidade foram designados como ponto “A” e ponto “B”. Como o topo do morro é um pequeno patamar, o ponto “A” é o ponto que fica no topo do morro mais para o centro, e o ponto “B” é localizado na extremidade do topo do morro. Nas figuras 36 a 39 pode-se observar a localização dos pontos supracitados para cada ângulo de incidência.

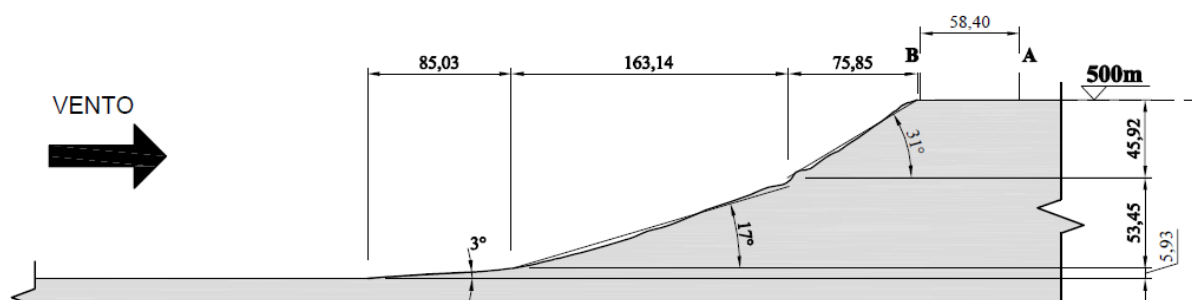


Figura 36 – Corte transversal do ângulo de incidência de 10° , dimensões em metros.

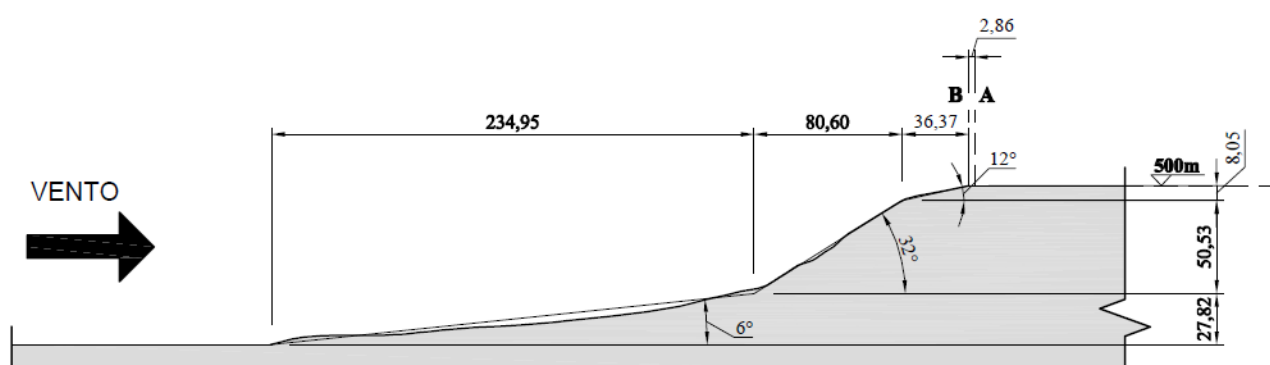


Figura 37 – Corte transversal do ângulo de incidência de 200° , dimensões em metros.

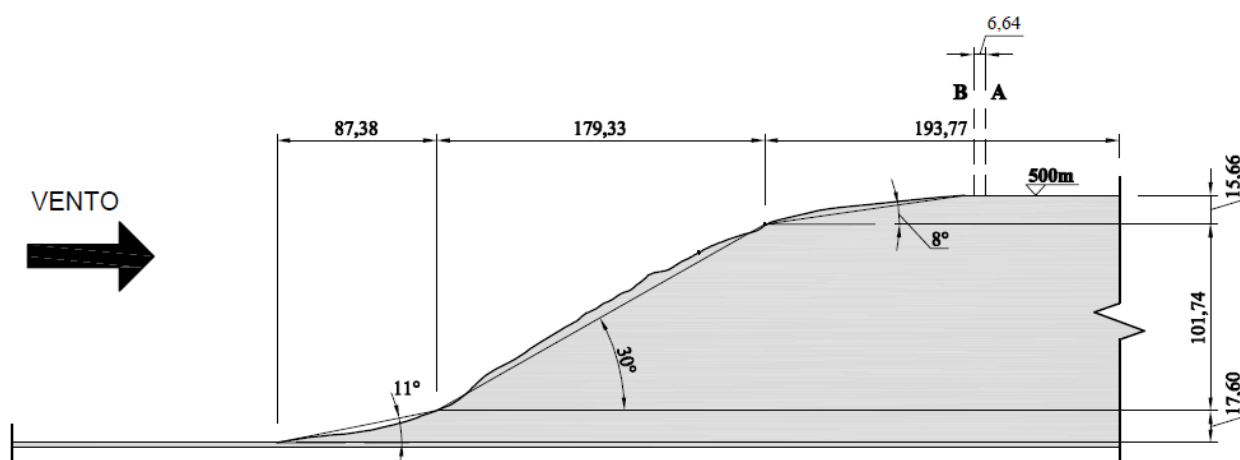


Figura 38 – Corte transversal do ângulo de incidência de 288° , dimensões em metros.

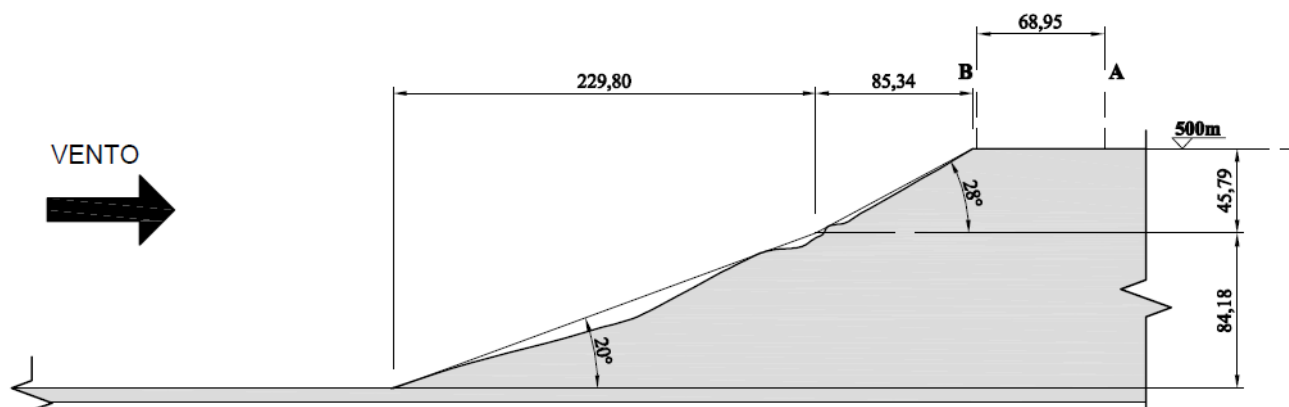


Figura 39 – Corte transversal do ângulo de incidência de 327° , dimensões em metros.

Na figura 40, podemos observar o modelo reduzido de um morro real construído, a vista é a barlavento e está na diretriz do ângulo de 288° . Além do estudo do morro isolado, ou parcialmente isolado, realizou-se outro estudo o qual foi estendida a mesa a barlavento (mesa auxiliar), para todos os ângulos de incidência (figura 41). A extensão a partir do morro isolado foi de 2,7 km, o que torna ainda mais próximo da realidade o estudo do morro.

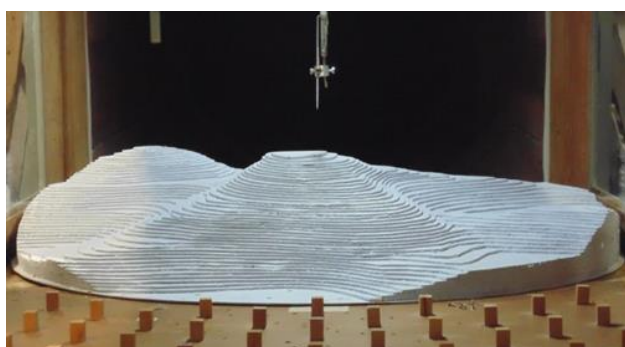


Figura 40 – Vista a barlavento do ângulo de incidência de 288° do modelo reduzido real



Figura 41 – Vista a barlavento do ângulo de incidência de 288° com mesa auxiliar do modelo reduzido real

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em túnel de vento dos ensaios experimentais, as comparações com as normas e modelos analíticos apresentados. As normas abordadas foram: NBR 6123 (ABNT, 1988), ASCE 7-10 (ASCE, 2010), AS/NZS 1170.2 (AS/NZS, 2011), NBCC (NRCC, 2010), EUROCODE 1 (CEN, 2010), AIJ (AIJ, 2004).

5.1 TERRENO PLANO

Inicialmente, para avaliar a coerência entre os modelos analíticos realizou-se a análise de terreno plano. O objetivo foi garantir que todos os modelos pudessem reproduzir o mesmo perfil, ou o mais similar possível, quando o terreno não sofresse influência da topografia ou do tipo de ocupação. Para tanto, submeteu-se todas as formulações com características que a Norma Brasileira NBR 6123 prevê para um terreno com categoria II, visto que as velocidades básicas das normas analisadas consideram o tipo de terreno igual a essa categoria. Na figura 42 são apresentados os dados da comparação entre as normas, o eixo das abcissas está normalizado pela velocidade de referência na cota 450 mm.

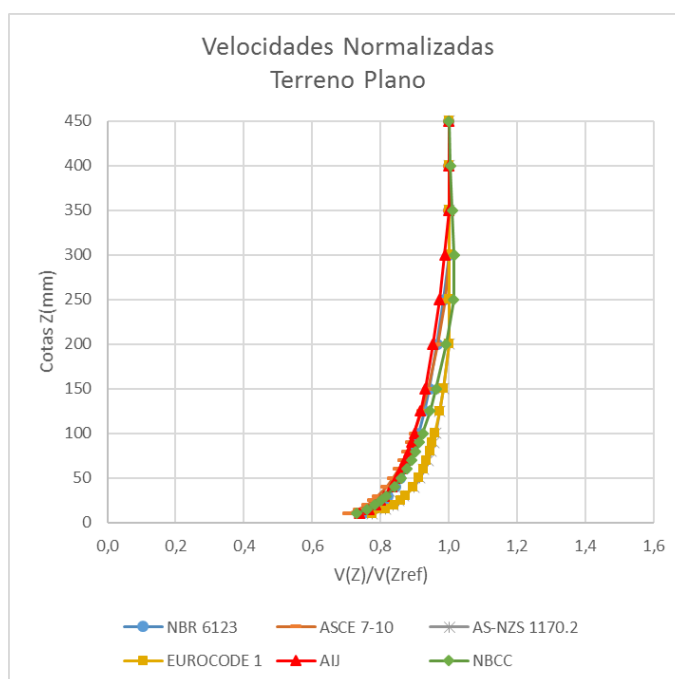


Figura 42 – Perfil de velocidades normalizadas para terreno plano categoria II.

5.2 MODELOS REDUZIDOS HIPOTÉTICOS

Os modelos reduzidos hipotéticos foram submetidos a ventos com duas rugosidades diferentes correspondente aos perfis de velocidade pela lei de potência com expoente $p = 0,11$ e $p = 0,23$, tanto para os modelos 2D como os 3D. Os pontos analisados foram designados como: ponto “A” (barlavento), ponto “B” (centro) e ponto “C” (sotavento). Os resultados obtidos em ensaios experimentais em túnel de vento são demonstrados por ponto nos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3.

5.2.1 Ponto “A”: barlavento

O ponto “A” localiza-se na metade da altura do morro e sua base é cotada a partir do sopé a barlavento. Além dos ensaios experimentais, aplicou-se as normas citadas no capítulo 3. Para tanto, utilizou-se os mesmos parâmetros, no caso do vento com expoente da lei de potência $p=0,11$, a categoria correspondente na NBR 6123 é a categoria I. Já para o vento com expoente da lei de potência $p=0,23$, a categoria correspondente na NBR 6123 é a categoria III e IV. Nem todas as normas possuem cinco categorias como a Norma Brasileira, base para este trabalho, porém todas foram calculadas com categorias similares as da NBR 6123. Assim, nas figuras 43 e 44 podem-se verificar os perfis de velocidades para o vento com expoente da lei de potência $p=0,11$, 2D e 3D respectivamente, medidos no ponto “A”.

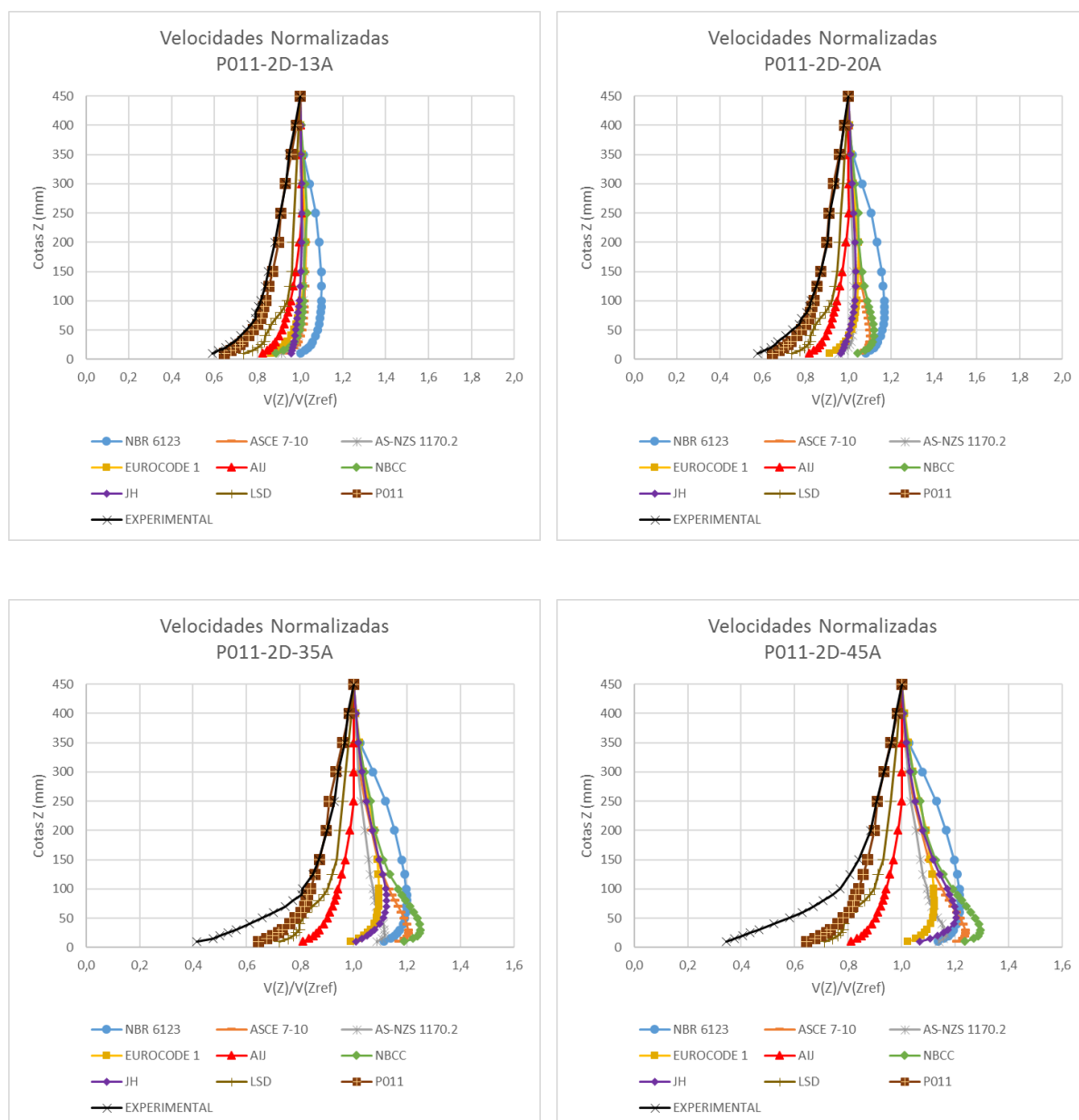


Figura 43 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$.

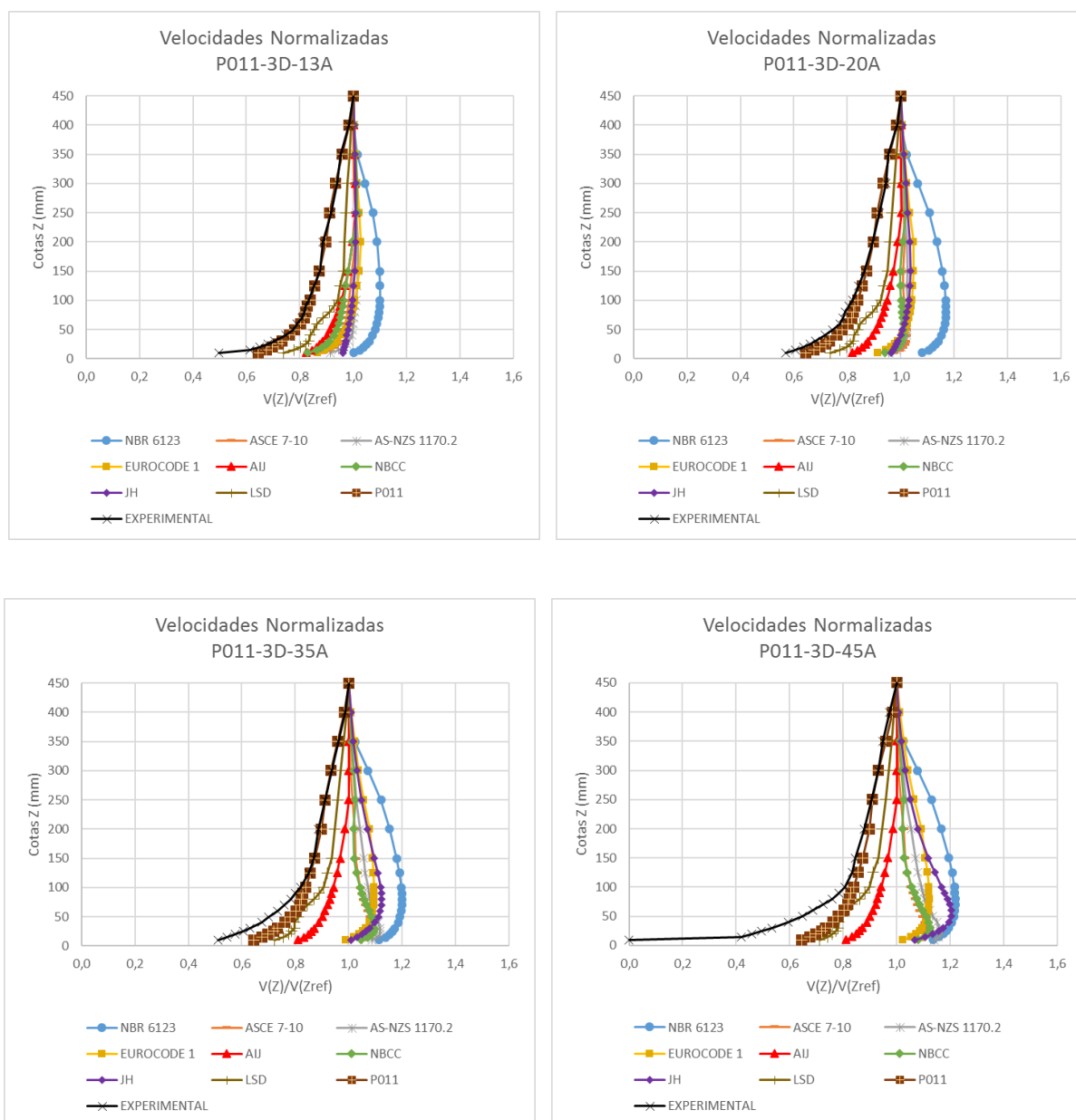


Figura 44 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$.

Os perfis de velocidades para vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ podem ser observados nas figuras 45 e 46, para modelos 2D e 3D, respectivamente, também medidos para o ponto “A”.

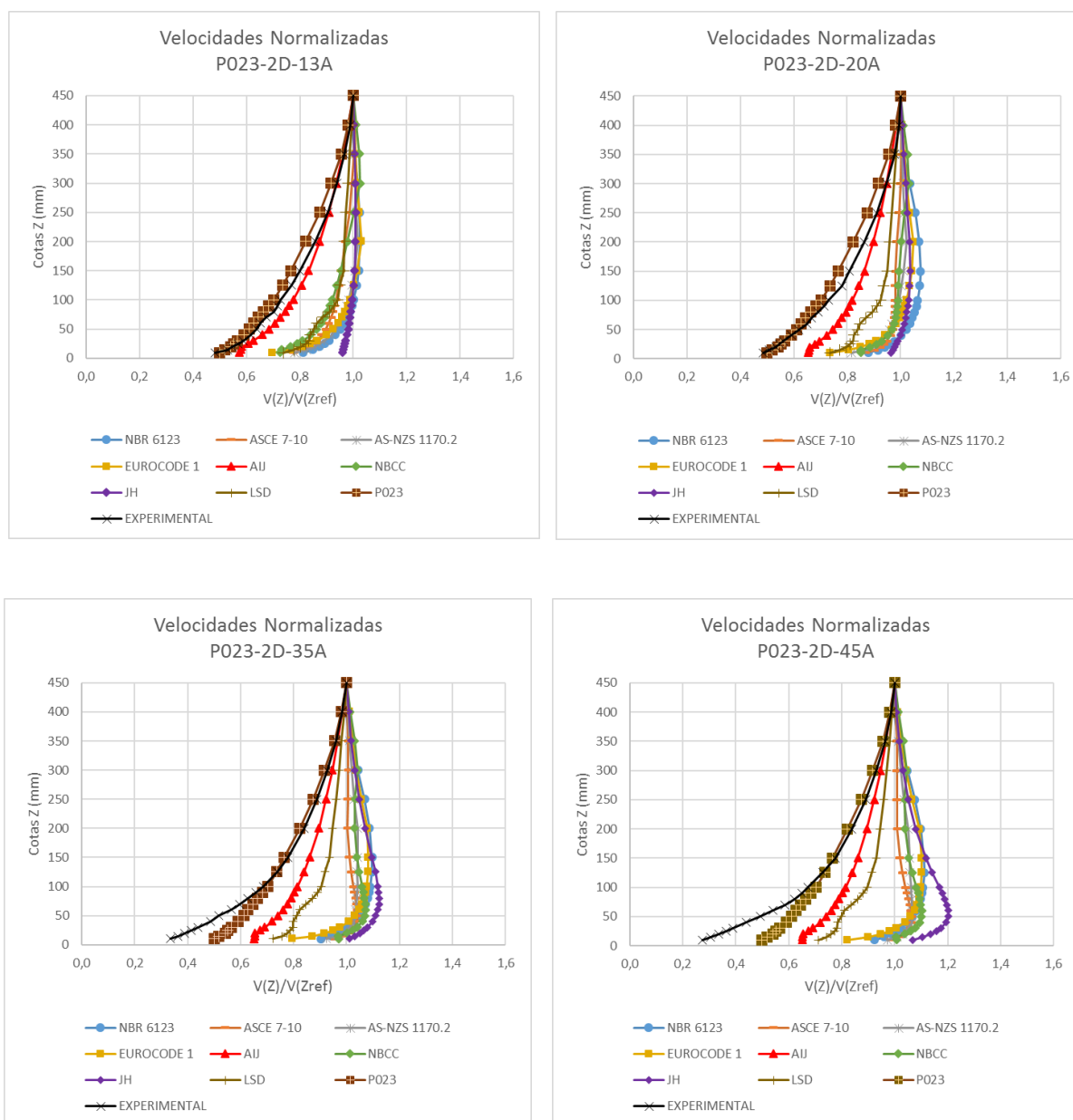


Figura 45 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$.

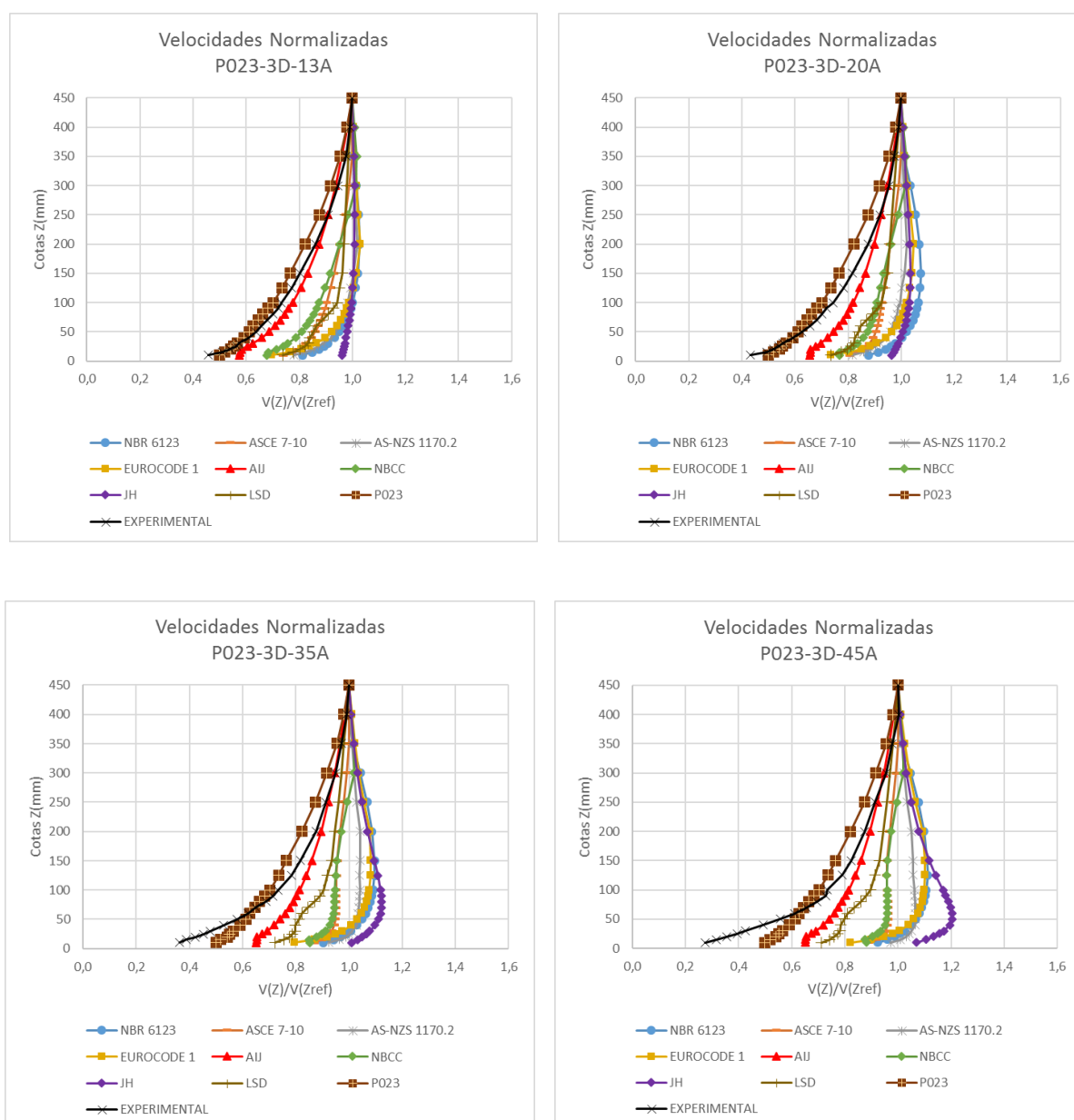


Figura 46 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “A”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$.

5.2.2 Ponto “B”: centro

O ponto “B” localiza-se no topo do morro a 150 mm de altura. Além dos ensaios experimentais, aplicou-se as normas citadas no capítulo 3. Para tanto, utilizou-se os mesmos parâmetros, no caso do vento com expoente da lei de potência $p=0,11$, a categoria correspondente na NBR 6123 é a categoria I. Já para o vento com expoente da lei de potência $p=0,23$, a categoria correspondente na NBR 6123 é a categoria III e IV. Nem todas as normas possuem cinco categorias como a Norma Brasileira, base para este trabalho, porém todas foram calculadas com

categorias similares as da NBR 6123. Assim, nas figuras 47 e 48 podem-se verificar os perfis de velocidades para o vento com expoente da lei de potência $p=0,11$, 2D e 3D respectivamente, medidos no ponto “B”. Os gráficos da figura 54 foram estendidos até o valor 2,6 no eixo $V(z)/V(z_{ref})$ para mostrar o comportamento do modelo JH (Jackson e Hunt).

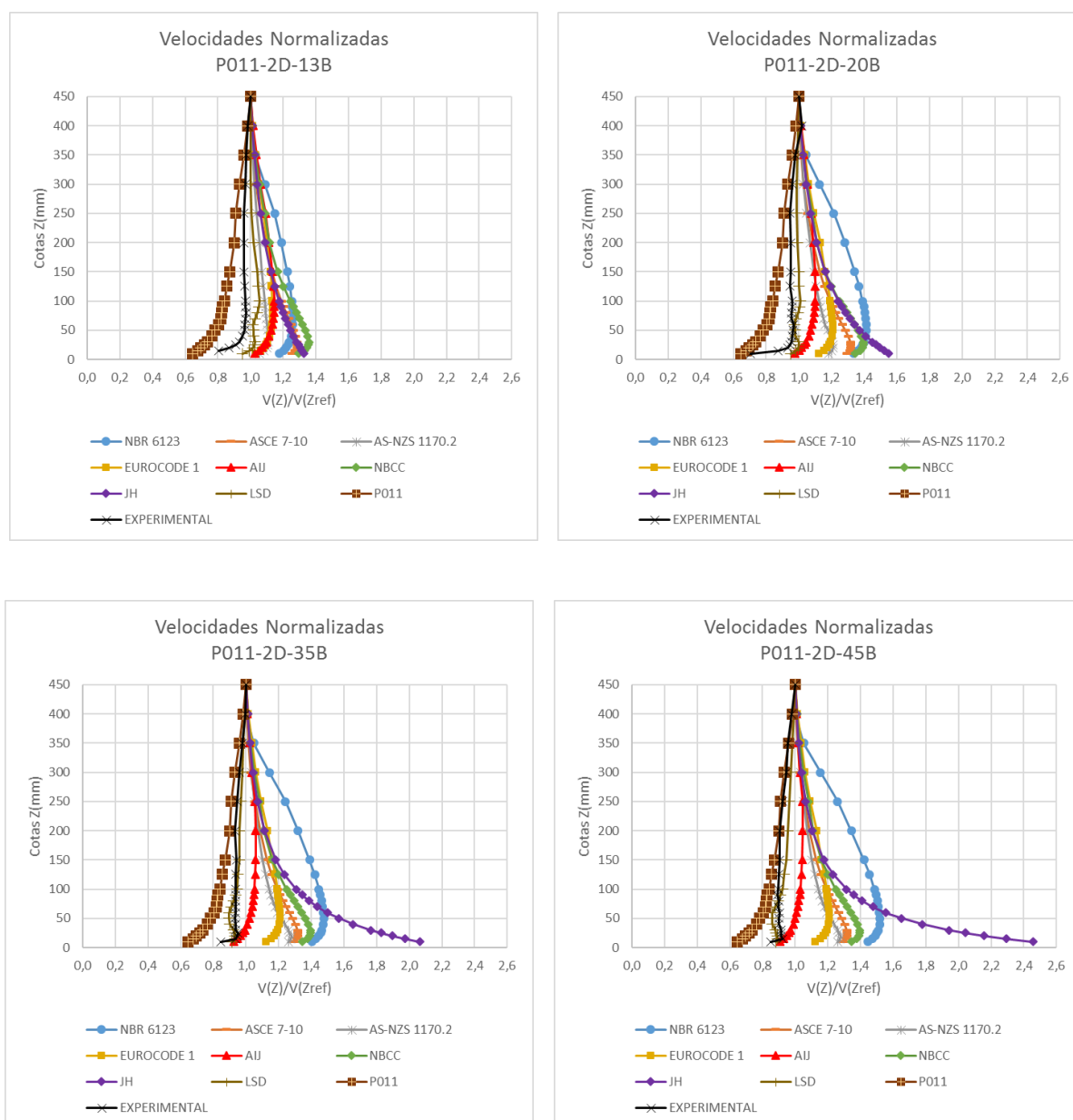


Figura 47 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$.

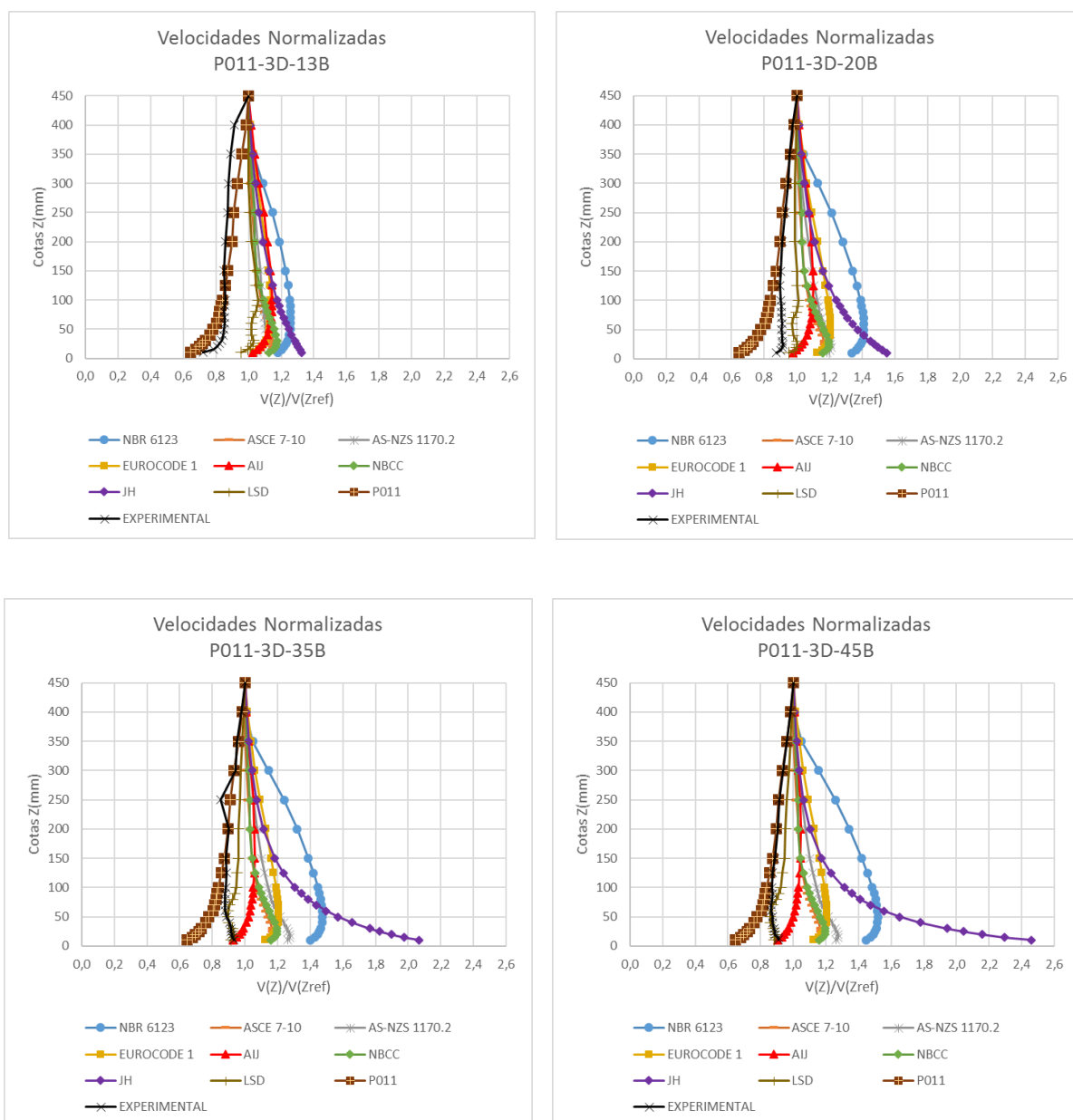


Figura 48 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência expoente da lei de potência $p=0,11$.

Os perfis de velocidades para vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ podem ser observados nas figuras 49 e 50, para modelos 2D e 3D, respectivamente, medidos no ponto

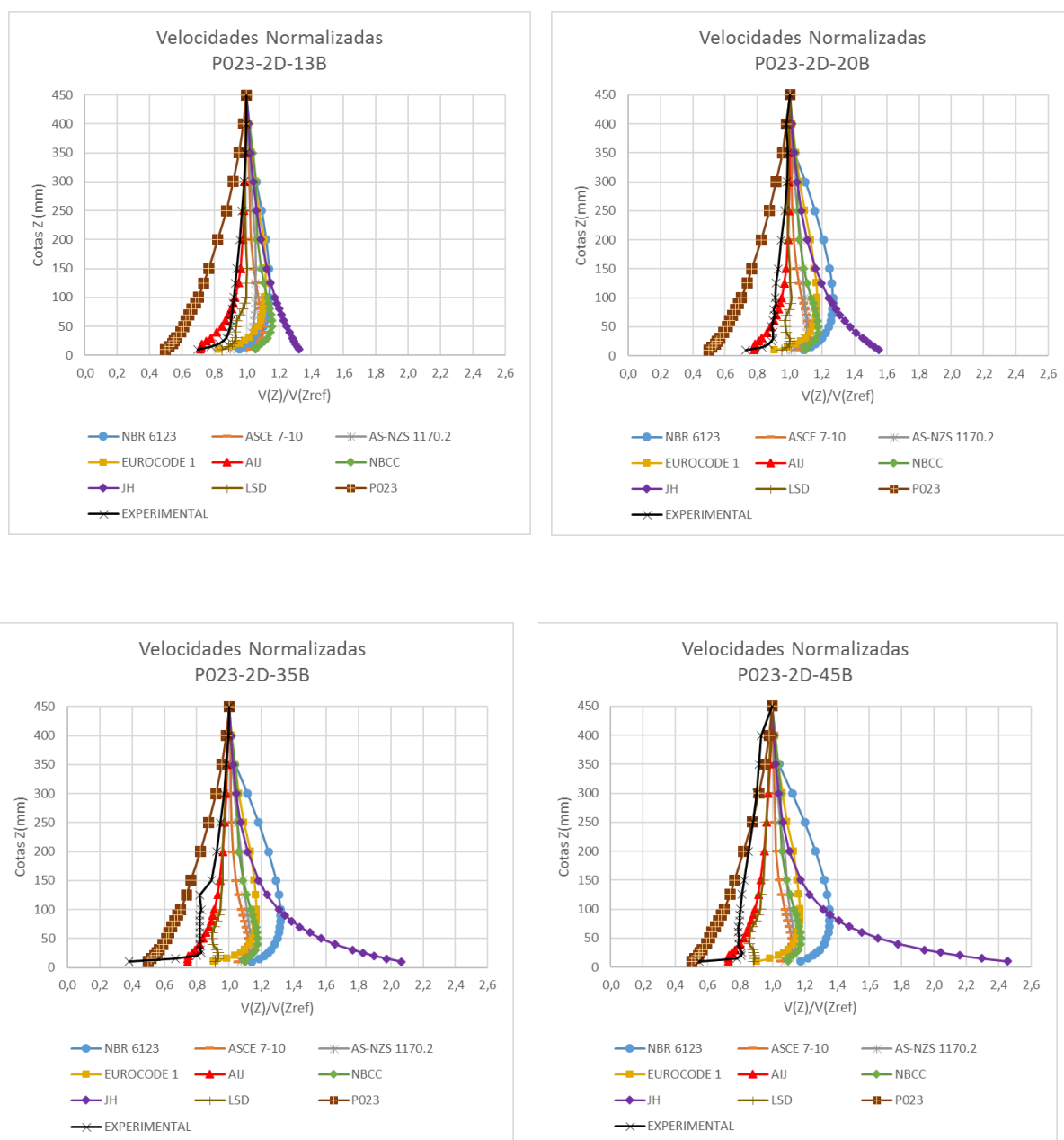


Figura 49 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$.

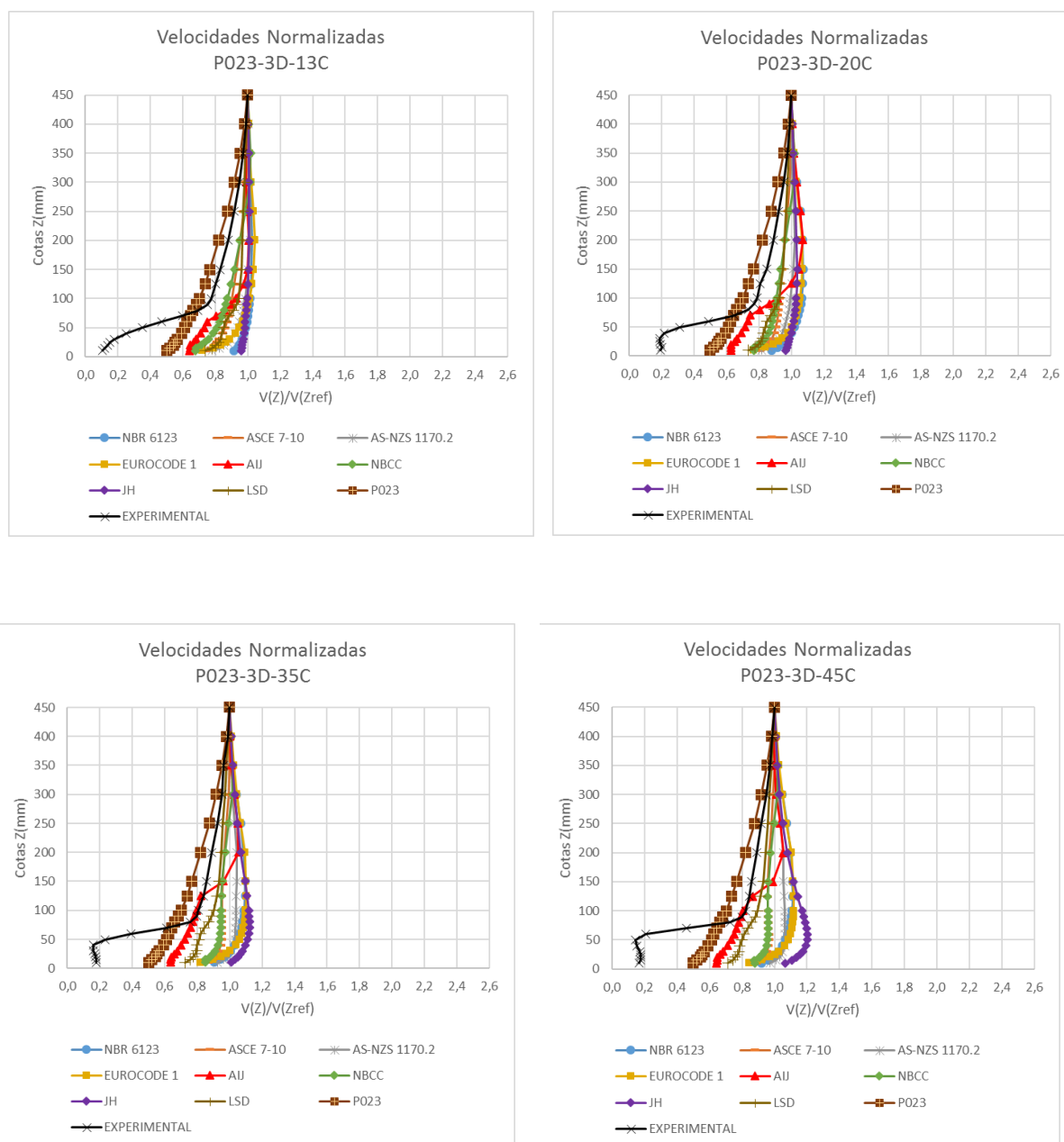


Figura 50 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “B”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência expoente da lei de potência $p=0,23$.

5.2.3 Ponto “C”: sotavento

O ponto “C” localiza-se na metade da altura do morro. As velocidades estão normalizadas pela cota 450 mm. Além dos ensaios experimentais, aplicou-se as normas citadas no capítulo 3. Os parâmetros e cálculos foram realizados da mesma forma que para os pontos “A” e “B”. Assim, nas figuras 51 e 52 podem-se verificar os perfis de velocidades para o vento com expoente da lei de potência $p=0,11$, 2D e 3D respectivamente, para o ponto “C”.

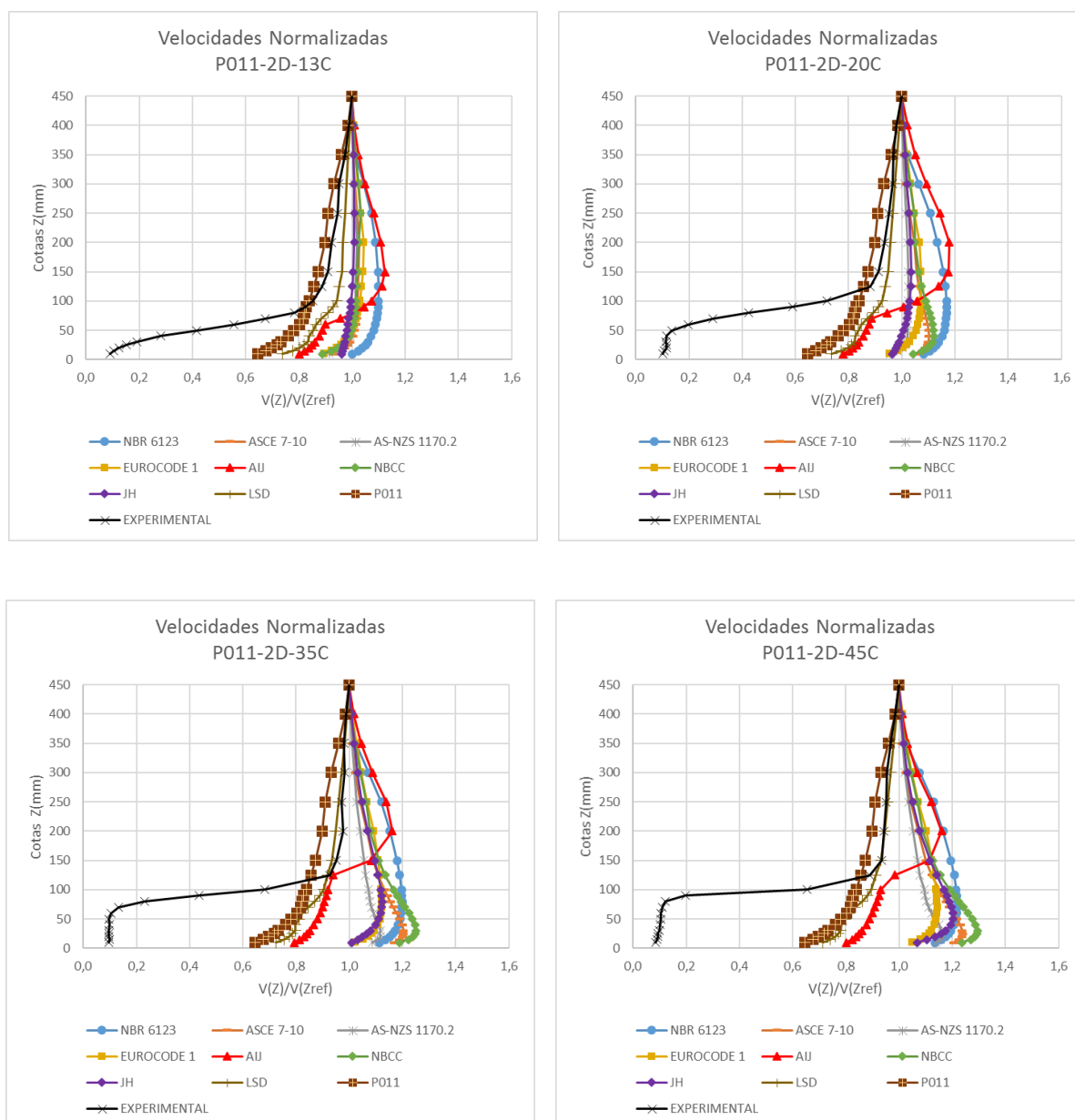


Figura 51 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$.

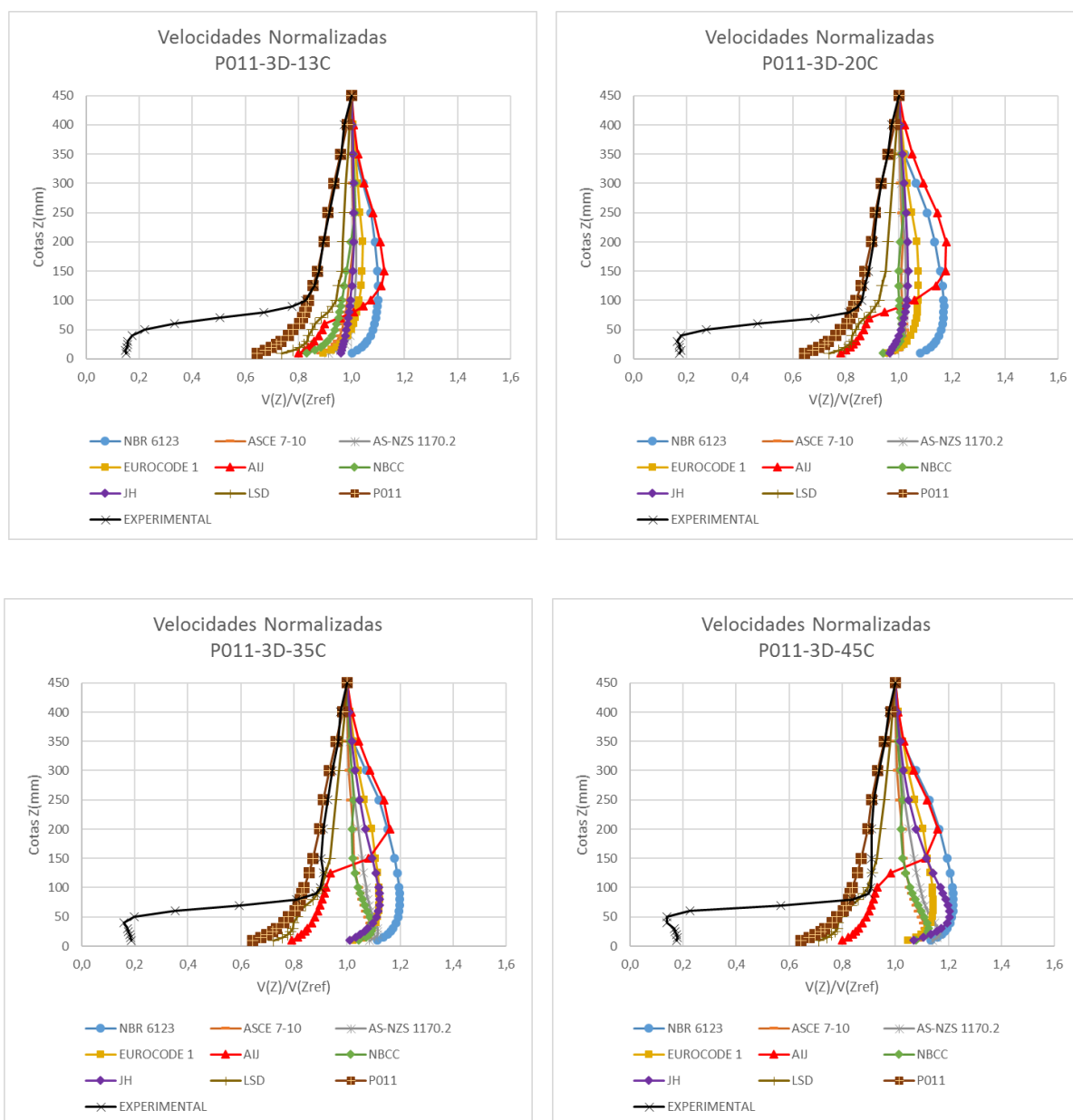


Figura 52 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,11$.

Os perfis de velocidades para vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ podem ser observados nas figuras 53 e 54, para modelos 2D e 3D, respectivamente, para o ponto “C”.

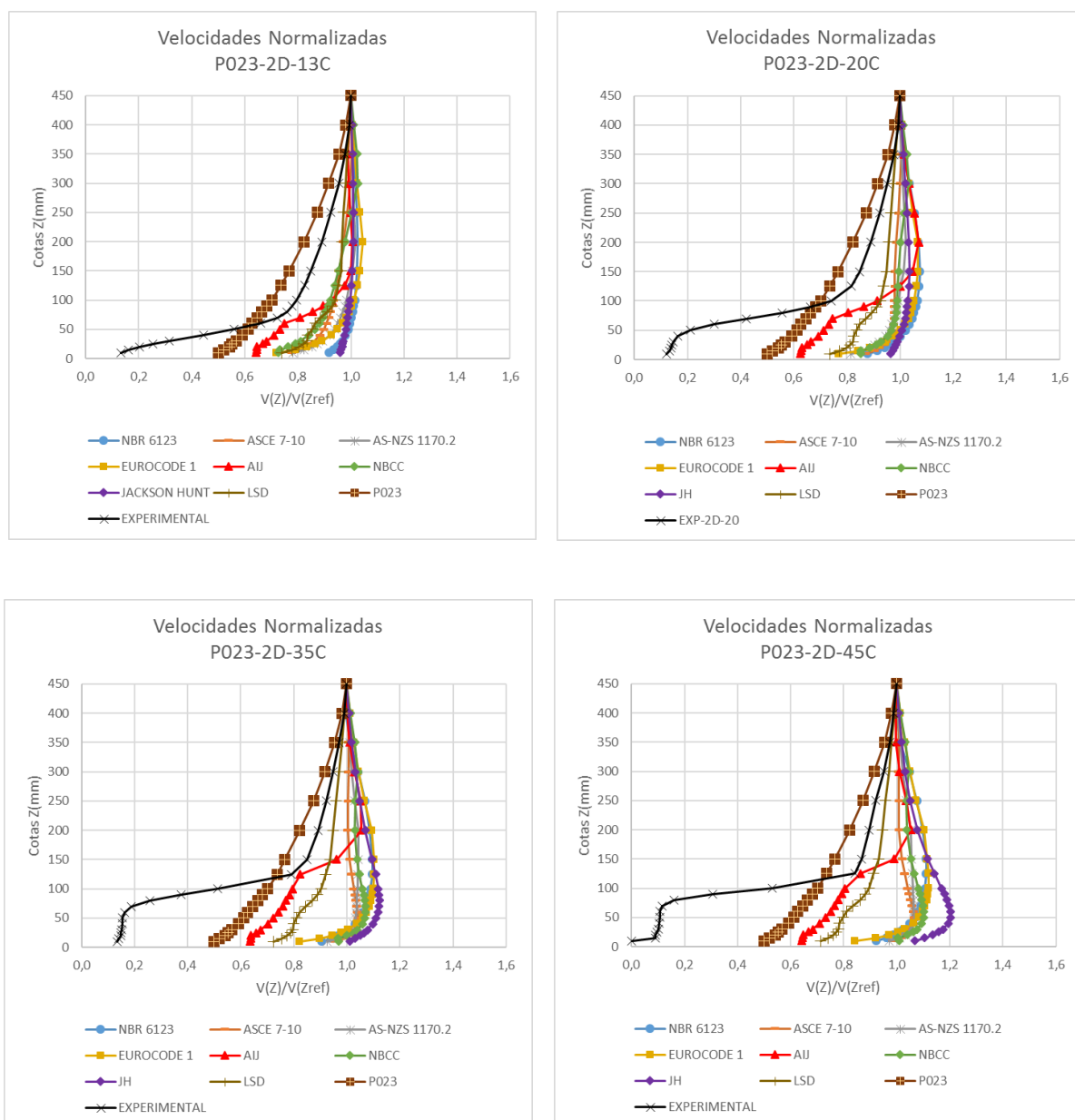


Figura 53 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 2D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$.

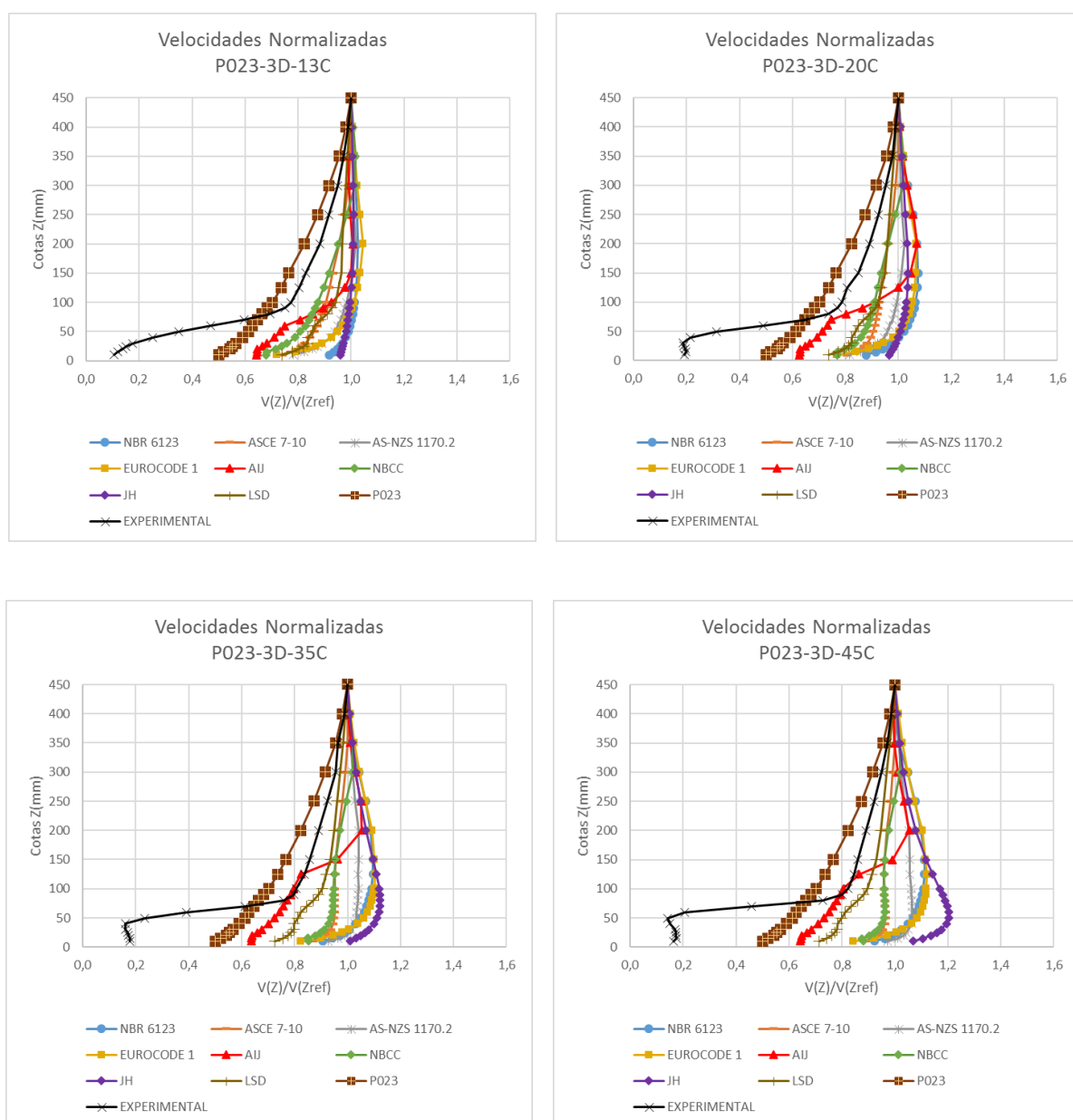


Figura 54 – Perfil de velocidades normalizadas para ponto “C”, modelo 3D, vento com expoente da lei de potência $p=0,23$.

Para realizar a comparação entre as diferentes normas citadas, foram necessários alguns ajustes para a velocidade básica. Estes ajustes foram realizados conforme o intervalo de tempo da velocidade básica para cada norma, conforme descritos no quadro 4.

5.2.4 Estudo comparativo entre modelos 2D e 3D

O estudo das normas e modelos analíticos realizado no capítulo 3 mostrou que apenas as normas Americana – ASCE e a norma Canadense – NBCC contemplam cálculos diferenciados para modelos 2D e 3D. Desta forma, os gráficos a seguir mostram a diferença desses modelos apenas

para essas 2 normas e os dados experimentais. Os dados apresentados na figura 55 referem-se as velocidades normalizadas, para o modelo de vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ no ponto “A”.

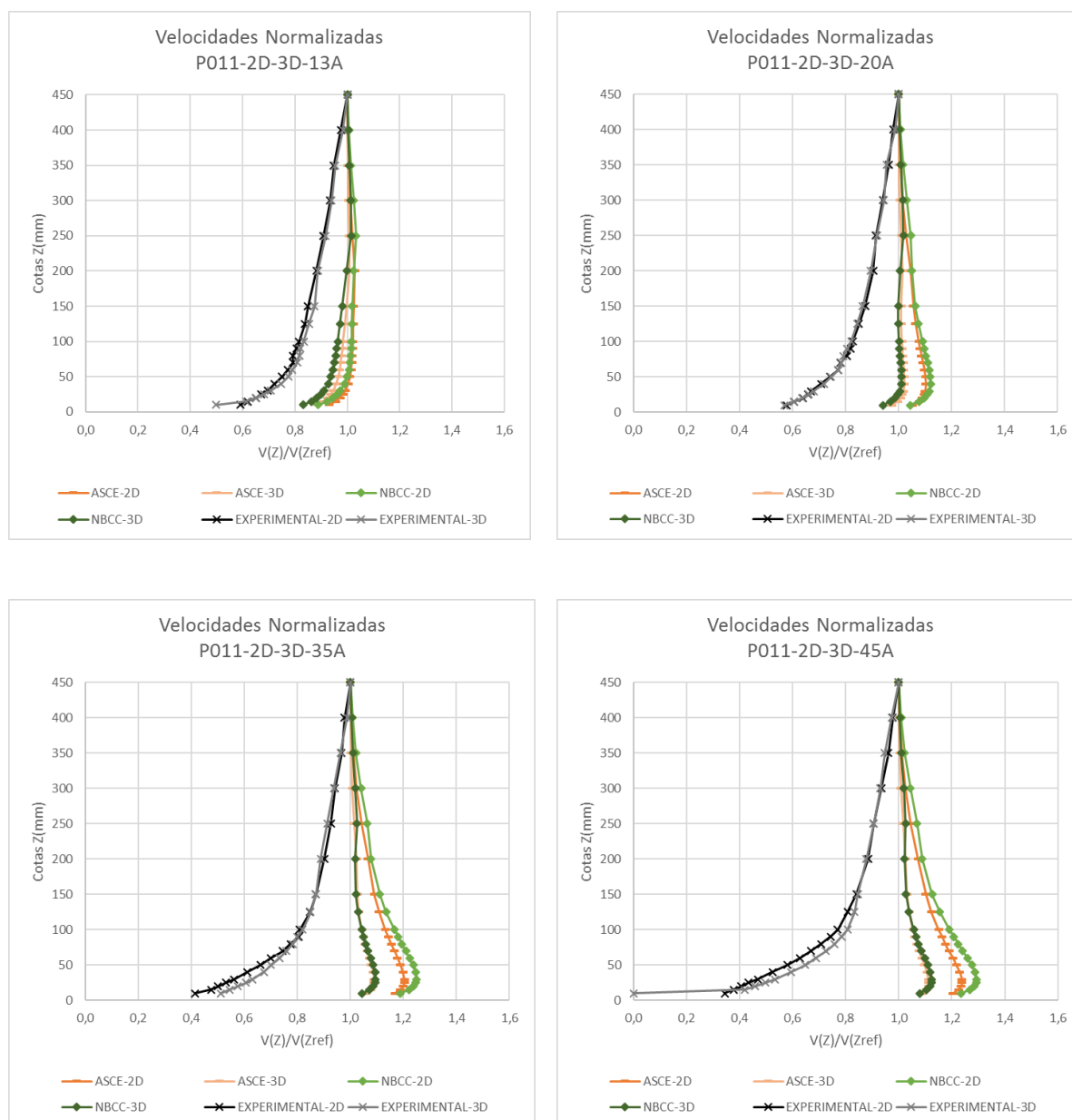


Figura 55 – Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto A e $p=0,11$, para as normas Americana e Canadense.

As normas Americana e Canadense consideram os modelos 2D com perfis de velocidades maiores que os modelos 3D. Para o modelo 3D, as normas Americana e Canadense tendem a ser sobrepostas.

Os dados apresentados na figura 56 referem-se as velocidades normalizadas, para o modelo de vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ no ponto “B”.

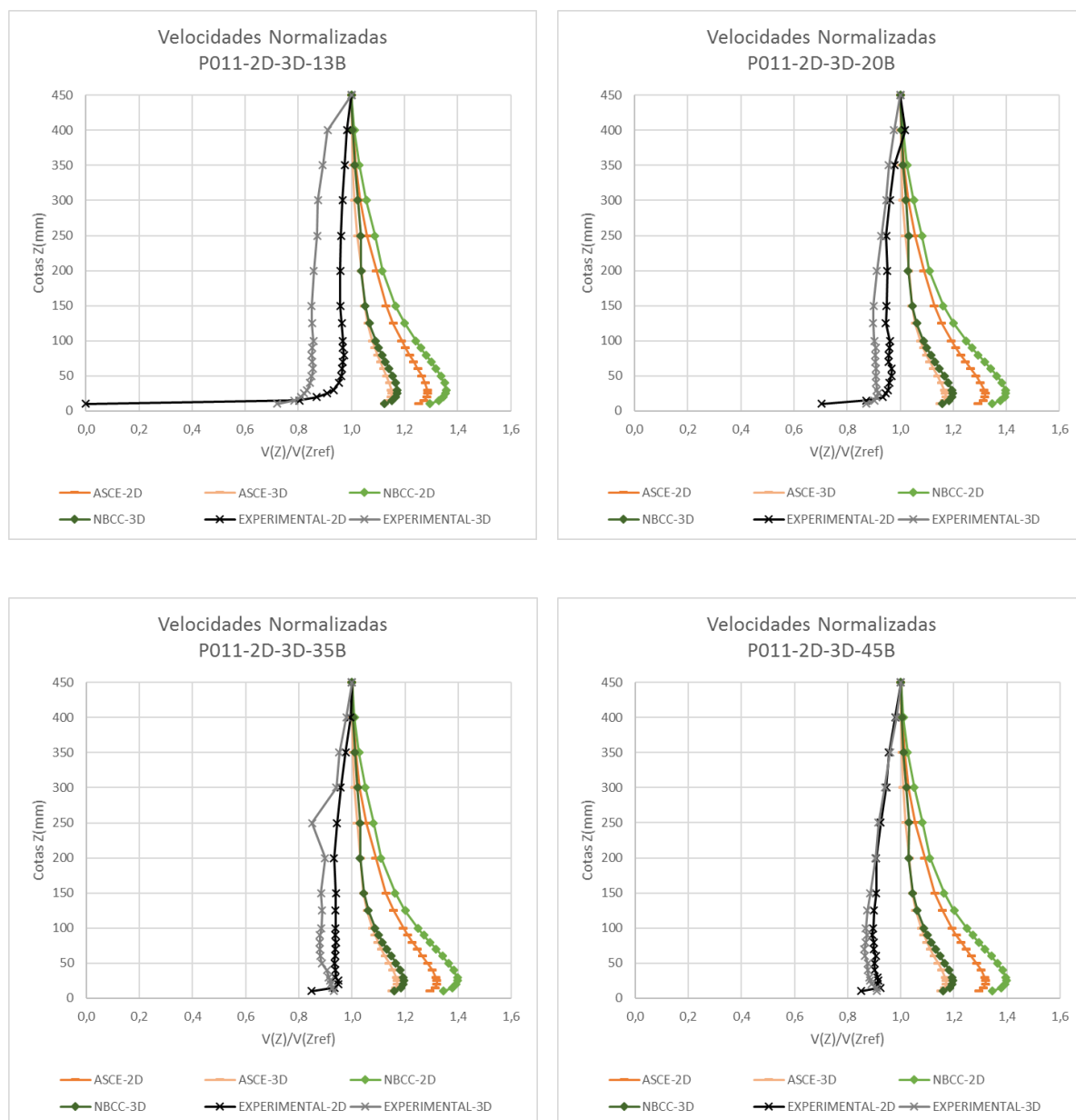


Figura 56 – Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto B e $p=0,11$, para as normas Americana e Canadense.

Assim como para o ponto “A”, ambas normas consideram os modelos 2D com perfis de velocidades maiores que os modelos 3D. Para o modelo 3D, as normas Americana e Canadense tendem a ser sobrepostas.

Os dados apresentados na figura 57 referem-se as velocidades normalizadas, para o modelo de vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ no ponto “C”.

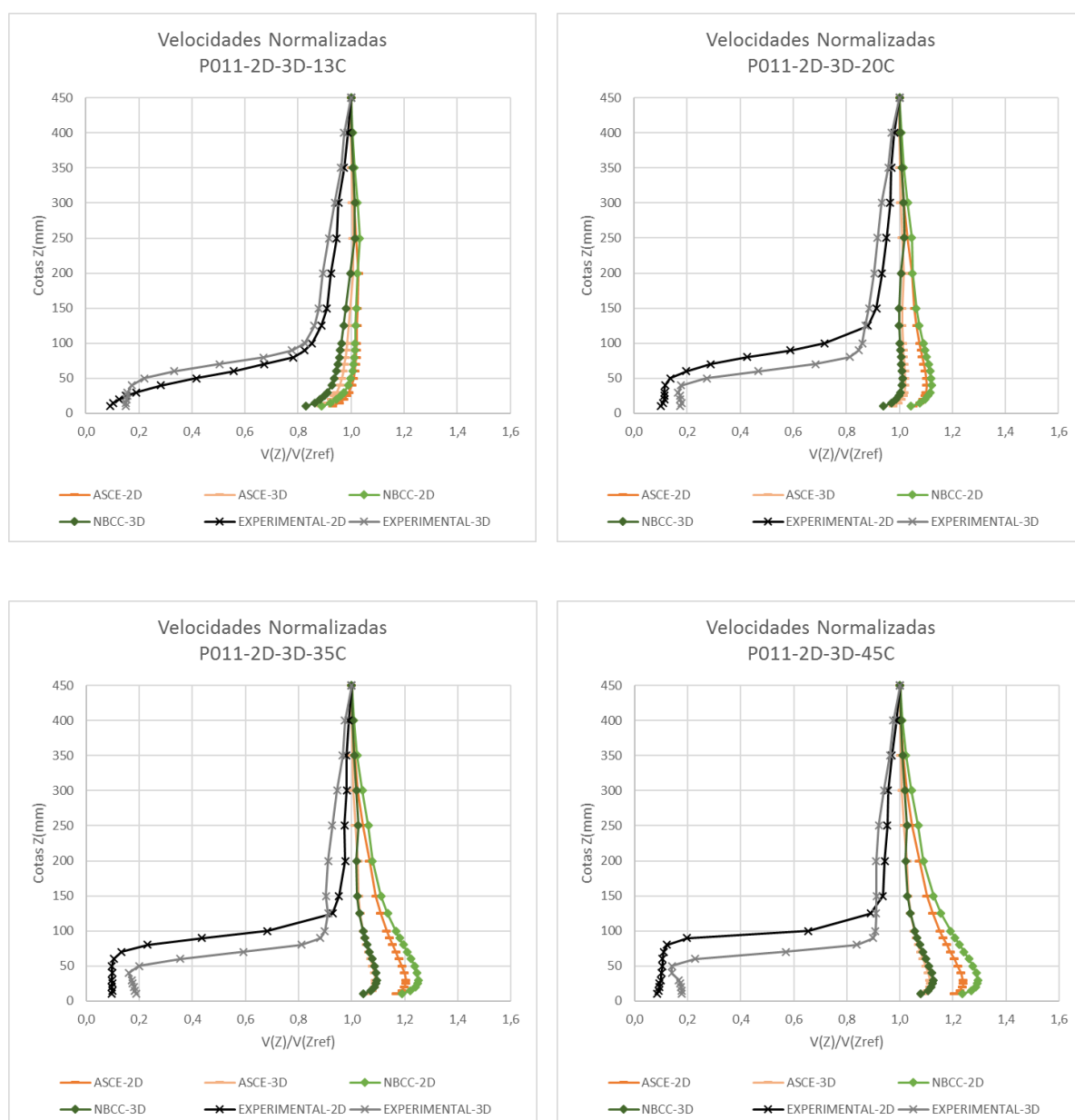


Figura 57 – Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto C e $p=0,11$, para as normas Americana e Canadense.

Da mesma forma que os pontos “A” e “B”, ambas normas consideram os modelos 2D com perfis de velocidades maiores que os modelos 3D. Para o modelo 3D, as normas Americana e Canadense tendem a ser sobrepostas. Porém nenhuma das normas acima analisadas é capaz de reproduzir o efeito da esteira como pode-se perceber nos dados experimentais.

As mesmas comparações são realizadas para o vento com expoente da lei de potência $p=0,23$. As figuras 58 a 60 mostram os perfis de velocidades para o vento com expoente $p = 0,23$, nos pontos “A”, “B” e “C”, respectivamente.

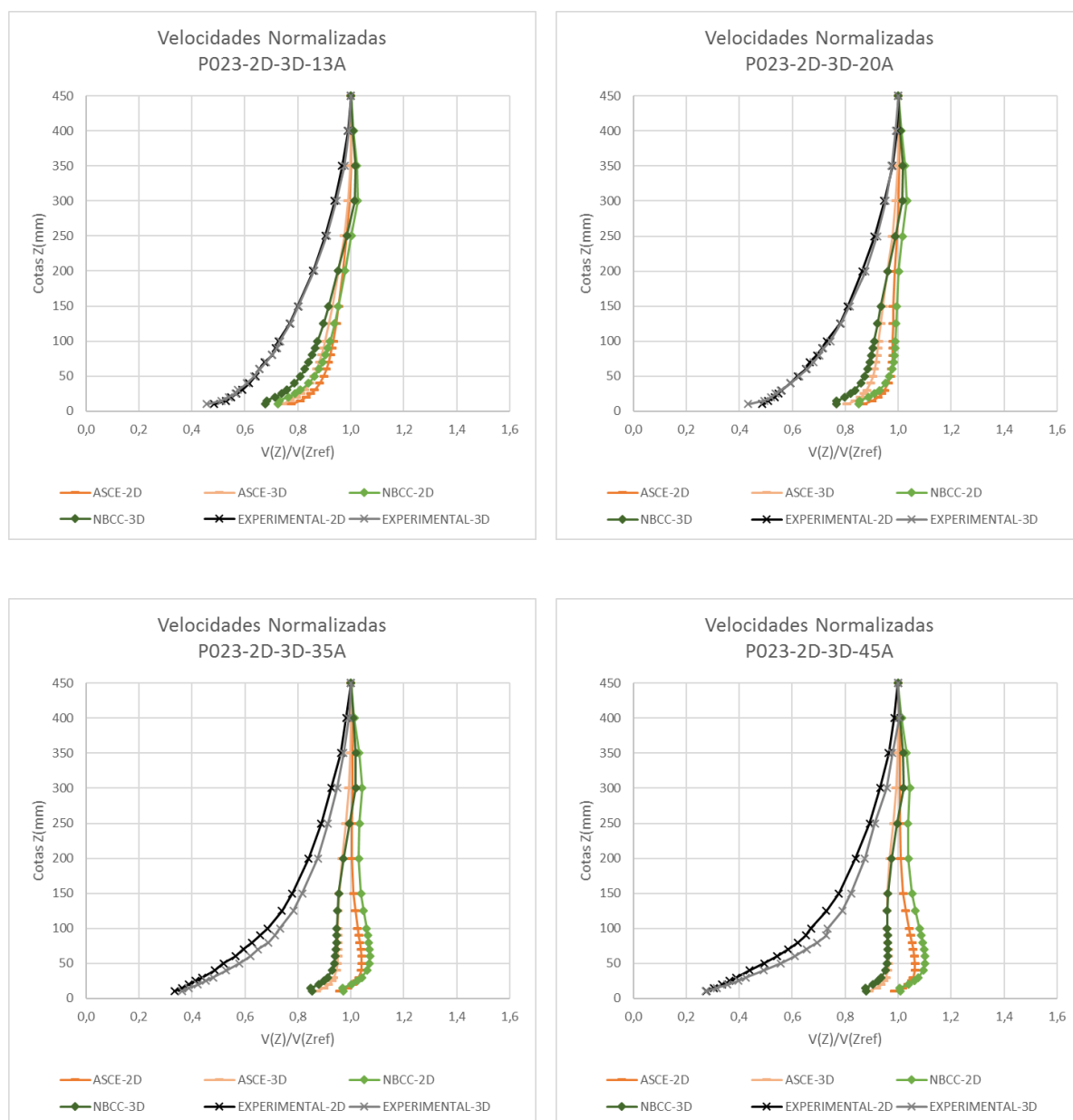


Figura 58 – Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto A e $p=0,23$, para as normas Americana e Canadense.

Ao analisar os gráficos da figura 64 pode-se observar que ambas normas consideram os modelos 2D com perfis de velocidades maiores que os modelos 3D. Para o modelo 3D, as normas Americana e Canadense tendem a ser sobrepostas.

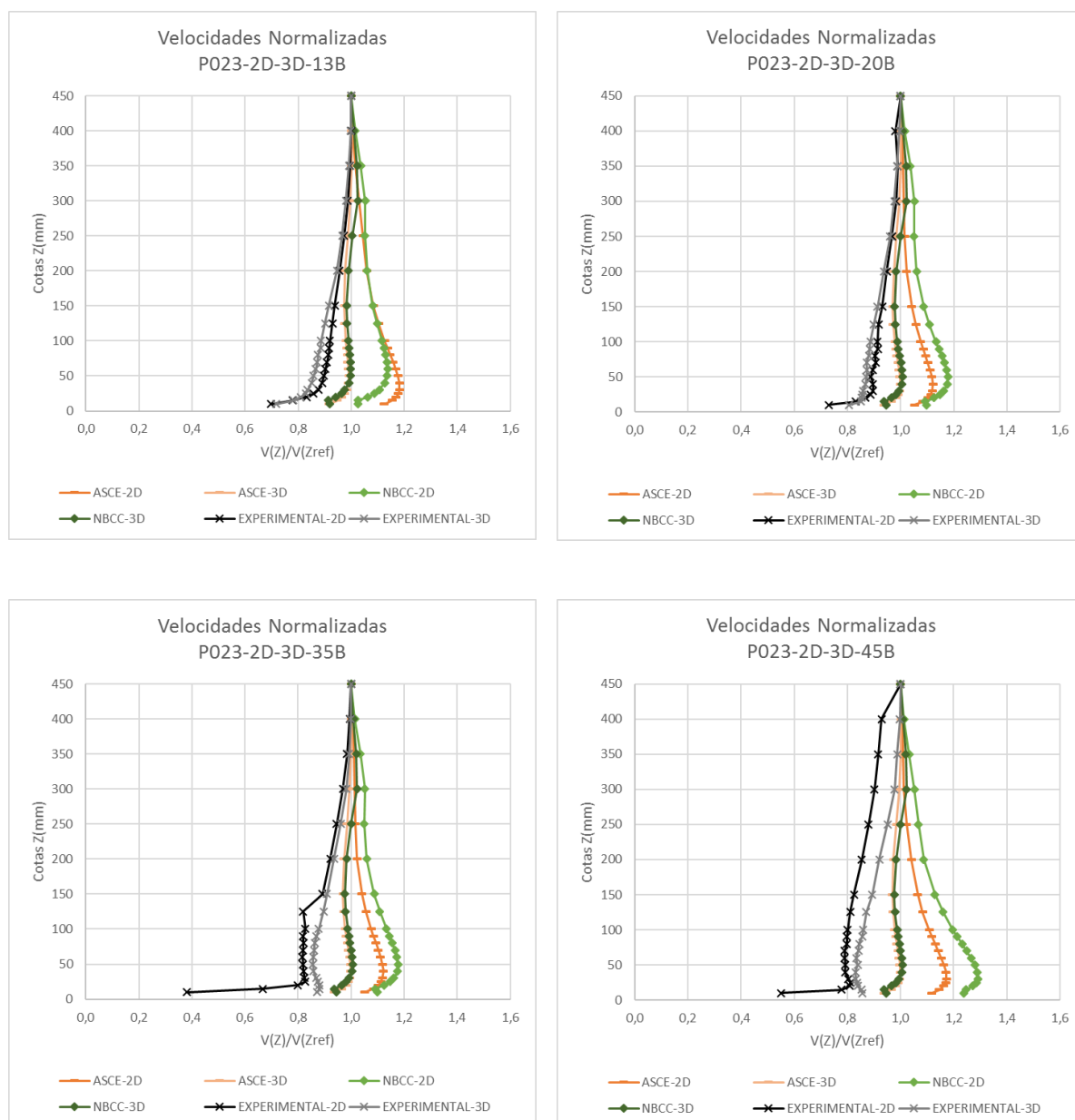


Figura 59 – Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto B e $p=0,23$, para as normas Americana e Canadense.

Ao analisar os gráficos da figura 59 ambas normas consideram os modelos 2D com perfis de velocidades maiores que os modelos 3D. Para o modelo 3D, as normas Americana e Canadense tendem a ser sobrepostas. Além disso, como o que é observado na figura 65, as normas Americana e Canadense superestimam o perfil de velocidades, quando comparado com os dados experimentais.

A figura 60 apresenta os gráficos para o ponto “C” nesse caso, diferentemente dos pontos “A” e “B”, pode-se observar que mesmo considerando os efeitos da dimensionalidade do morro,

essas normas não reproduzem o efeito da esteira verificados nos perfis de velocidades dos dados experimentais.

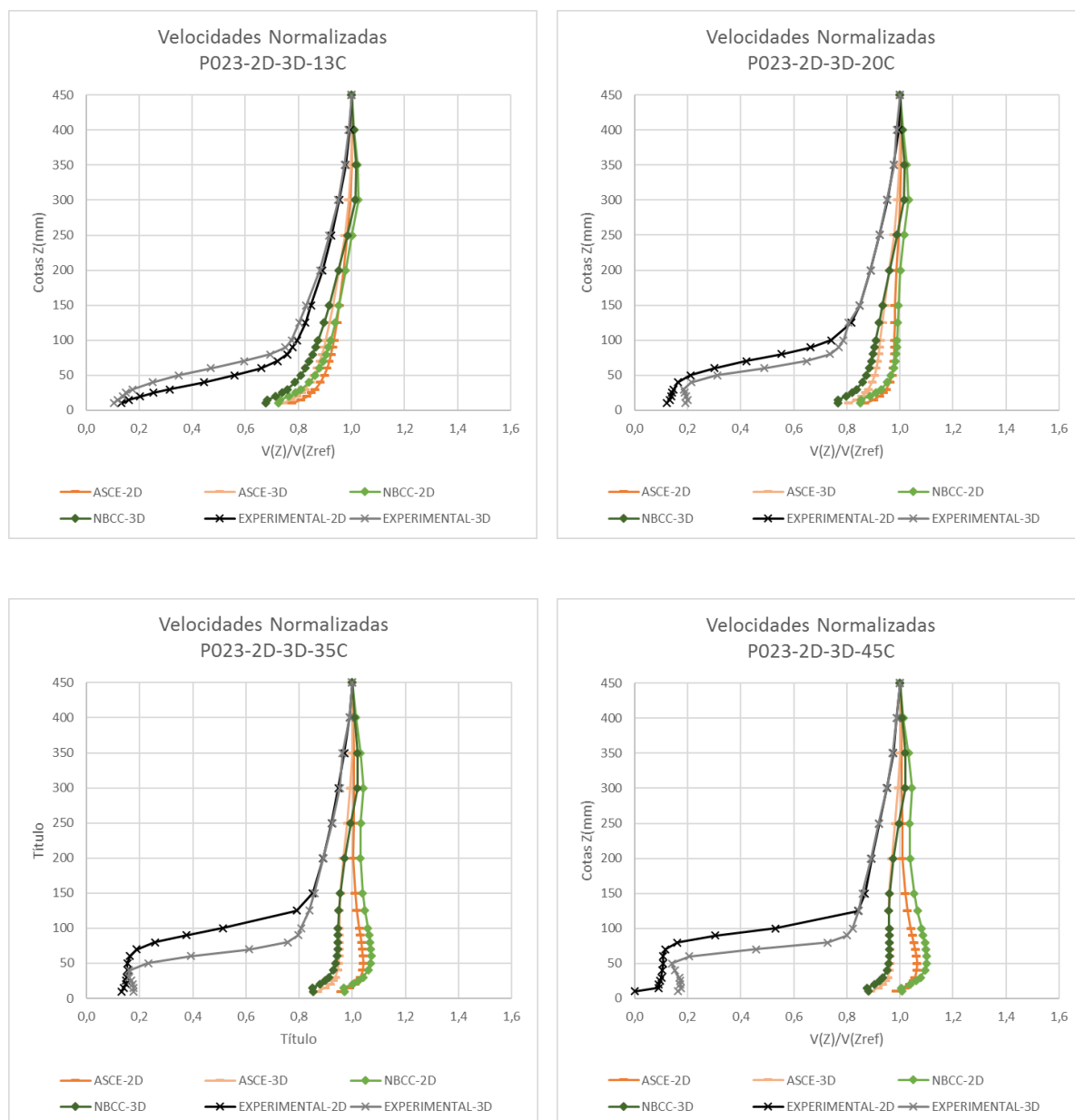


Figura 60 – Perfil de velocidades normalizadas para modelos 2D e 3D – Ponto C e $p=0,23$, para as normas Americana e Canadense.

5.2.5 Estudo quantitativo dos modelos hipotéticos 2D e 3D

Além das comparações qualitativas realizadas anteriormente, nesse item é apresentado um estudo quantitativo. Nas tabelas abaixo descritas serão apresentados os valores percentuais de quanto às normas superestimam os valores em relação ao experimento.

5.2.5.1 Variação percentual para o ponto “A”

Inicialmente, o estudo é realizado para os modelos 2D, ponto “A”, o expoente da lei de potência é $p=0,11$, conforme pode ser observado nas tabelas 17 a 20.

Tabela 17 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 13° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	69%	57%	55%	46%	39%	50%	62%	25%
15	65%	54%	53%	45%	37%	49%	56%	26%
20	59%	49%	48%	41%	32%	45%	48%	23%
25	56%	46%	45%	39%	30%	43%	44%	22%
30	52%	43%	41%	35%	27%	40%	40%	20%
40	48%	39%	38%	33%	25%	37%	35%	16%
50	44%	35%	33%	30%	22%	33%	31%	14%
60	41%	31%	29%	27%	20%	30%	27%	12%
70	38%	28%	27%	25%	18%	27%	25%	12%
80	39%	29%	27%	26%	19%	28%	25%	15%
90	36%	27%	25%	24%	18%	26%	23%	15%
100	35%	25%	24%	23%	17%	24%	22%	15%
125	31%	22%	21%	21%	16%	21%	19%	14%
150	29%	21%	20%	20%	15%	20%	18%	13%
200	23%	17%	15%	17%	13%	16%	14%	10%
250	18%	12%	11%	12%	11%	14%	11%	7%
300	12%	8%	8%	9%	8%	10%	8%	5%
350	7%	6%	6%	6%	6%	7%	6%	4%
400	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 18 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 20° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	87%	82%	66%	58%	41%	81%	67%	27%
15	82%	77%	62%	56%	38%	77%	60%	27%
20	75%	70%	57%	51%	34%	71%	53%	25%
25	71%	66%	53%	48%	31%	68%	49%	23%
30	70%	64%	51%	48%	31%	66%	48%	23%
40	63%	56%	44%	42%	26%	58%	41%	17%
50	56%	49%	38%	37%	22%	51%	36%	13%
60	51%	42%	32%	33%	19%	44%	31%	10%
70	49%	40%	31%	32%	19%	42%	31%	11%
80	45%	35%	27%	29%	16%	37%	27%	11%
90	43%	32%	25%	27%	15%	34%	26%	11%
100	41%	30%	24%	26%	15%	32%	25%	12%
125	37%	25%	20%	23%	13%	26%	22%	10%
150	32%	21%	17%	20%	11%	22%	19%	9%
200	25%	16%	13%	16%	9%	16%	14%	6%
250	21%	13%	11%	13%	10%	14%	12%	6%
300	13%	8%	7%	9%	7%	10%	8%	4%
350	6%	5%	4%	5%	4%	5%	5%	2%
400	2%	2%	2%	3%	2%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 19 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 35° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	168%	182%	162%	138%	96%	187%	143%	74%
15	140%	151%	133%	115%	76%	158%	118%	59%
20	130%	140%	123%	108%	69%	147%	110%	55%
25	119%	127%	110%	99%	62%	135%	101%	49%
30	109%	115%	99%	89%	55%	123%	92%	42%
40	94%	96%	82%	76%	45%	104%	80%	31%
50	81%	80%	67%	64%	36%	87%	68%	23%
60	71%	68%	56%	56%	30%	75%	60%	17%
70	61%	57%	46%	47%	24%	62%	51%	13%
80	55%	49%	39%	42%	20%	54%	45%	13%
90	49%	42%	33%	36%	16%	46%	39%	10%
100	48%	40%	33%	35%	16%	44%	38%	12%
125	40%	31%	25%	29%	13%	34%	31%	8%
150	36%	25%	21%	25%	11%	28%	26%	8%
200	28%	18%	16%	20%	9%	20%	19%	5%
250	21%	12%	11%	14%	8%	15%	13%	4%
300	14%	9%	8%	10%	6%	10%	9%	3%
350	6%	5%	5%	6%	3%	6%	5%	2%
400	2%	3%	3%	3%	2%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 20 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 45° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	230%	250%	231%	197%	136%	259%	210%	107%
15	208%	226%	207%	180%	121%	237%	194%	97%
20	189%	204%	187%	164%	109%	216%	179%	87%
25	174%	187%	169%	151%	99%	199%	168%	79%
30	155%	164%	148%	134%	86%	177%	151%	67%
40	130%	135%	120%	112%	70%	146%	128%	50%
50	109%	110%	96%	93%	55%	120%	108%	38%
60	94%	92%	79%	78%	45%	100%	91%	29%
70	82%	78%	66%	68%	38%	86%	79%	25%
80	72%	66%	56%	59%	31%	73%	68%	22%
90	64%	57%	48%	51%	26%	63%	59%	19%
100	58%	50%	42%	46%	23%	55%	52%	17%
125	50%	39%	34%	38%	19%	43%	42%	13%
150	42%	31%	27%	32%	15%	34%	33%	11%
200	32%	21%	19%	23%	11%	23%	22%	7%
250	25%	16%	14%	18%	10%	18%	16%	6%
300	15%	10%	9%	12%	7%	12%	10%	4%
350	7%	5%	5%	7%	4%	6%	6%	2%
400	2%	3%	3%	3%	2%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

As tabelas 21 a 24 apresentam os valores para o modelo 2D, o expoente da lei de potência é $p=0,23$.

Tabela 21 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 13° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	68%	60%	61%	44%	19%	50%	98%	53%
15	60%	53%	56%	44%	9%	38%	82%	47%
20	59%	52%	56%	47%	6%	39%	76%	47%
25	57%	49%	54%	48%	6%	39%	70%	44%
30	54%	47%	51%	47%	6%	38%	65%	42%
40	51%	43%	49%	46%	7%	36%	58%	36%
50	49%	40%	47%	45%	7%	35%	53%	33%
60	48%	39%	45%	44%	8%	35%	51%	32%
70	45%	36%	42%	42%	8%	32%	46%	31%
80	40%	31%	38%	38%	6%	29%	41%	30%
90	39%	30%	36%	37%	6%	28%	39%	30%
100	38%	29%	35%	36%	7%	27%	37%	30%
125	32%	23%	29%	31%	5%	22%	30%	24%
150	28%	19%	26%	27%	4%	19%	26%	20%
200	20%	13%	19%	20%	2%	14%	18%	13%
250	13%	9%	12%	13%	0%	11%	12%	8%
300	8%	6%	7%	8%	0%	9%	7%	4%
350	4%	4%	4%	4%	-1%	6%	4%	2%
400	1%	1%	1%	2%	-1%	2%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 22 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 20° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	80%	78%	67%	51%	35%	75%	98%	51%
15	80%	77%	68%	58%	29%	67%	91%	52%
20	77%	73%	66%	60%	24%	66%	83%	49%
25	76%	71%	65%	61%	24%	66%	80%	48%
30	75%	69%	64%	62%	24%	66%	77%	47%
40	69%	63%	60%	59%	22%	61%	69%	39%
50	64%	56%	55%	56%	20%	56%	62%	35%
60	59%	50%	49%	51%	17%	50%	56%	30%
70	57%	47%	47%	50%	17%	47%	53%	30%
80	52%	41%	42%	45%	15%	42%	48%	29%
90	49%	37%	39%	42%	13%	39%	44%	28%
100	46%	34%	36%	40%	12%	36%	41%	27%
125	37%	26%	29%	33%	8%	27%	33%	20%
150	33%	21%	25%	29%	7%	23%	28%	17%
200	24%	14%	18%	21%	4%	16%	20%	11%
250	16%	9%	11%	14%	2%	11%	13%	6%
300	9%	6%	7%	8%	0%	9%	8%	3%
350	3%	3%	3%	4%	-1%	5%	4%	1%
400	0%	1%	1%	1%	-1%	2%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 23 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 35° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	170%	186%	177%	138%	94%	190%	202%	116%
15	159%	172%	165%	139%	79%	166%	184%	108%
20	150%	161%	155%	137%	69%	159%	171%	100%
25	140%	148%	142%	130%	63%	148%	158%	91%
30	129%	135%	131%	122%	58%	137%	146%	82%
40	112%	114%	112%	108%	48%	118%	126%	64%
50	102%	101%	99%	99%	43%	106%	114%	57%
60	88%	84%	83%	85%	35%	90%	98%	46%
70	80%	74%	74%	78%	30%	80%	89%	42%
80	72%	65%	66%	70%	26%	70%	79%	39%
90	65%	57%	58%	63%	22%	62%	71%	35%
100	59%	49%	52%	57%	19%	54%	63%	32%
125	48%	38%	41%	46%	14%	42%	50%	24%
150	41%	30%	34%	39%	11%	33%	41%	20%
200	29%	19%	24%	28%	7%	23%	27%	13%
250	20%	13%	16%	19%	4%	16%	18%	8%
300	13%	9%	10%	12%	2%	12%	11%	5%
350	5%	5%	5%	6%	0%	7%	6%	2%
400	2%	2%	2%	3%	0%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 24 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 45° - 2D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	235%	258%	253%	199%	137%	267%	288%	159%
15	215%	233%	231%	194%	114%	229%	262%	143%
20	194%	209%	207%	182%	95%	209%	238%	126%
25	177%	189%	187%	170%	86%	192%	218%	113%
30	163%	172%	170%	158%	78%	177%	202%	101%
40	139%	142%	142%	137%	64%	149%	172%	79%
50	116%	115%	116%	115%	50%	123%	143%	62%
60	99%	96%	96%	99%	40%	103%	122%	50%
70	86%	80%	82%	85%	32%	88%	104%	42%
80	77%	69%	71%	76%	27%	76%	91%	38%
90	69%	61%	63%	68%	23%	67%	81%	35%
100	65%	55%	58%	64%	21%	61%	74%	34%
125	53%	41%	45%	51%	15%	46%	57%	25%
150	43%	31%	36%	42%	11%	36%	44%	20%
200	31%	20%	25%	30%	7%	24%	28%	13%
250	21%	13%	16%	19%	3%	16%	18%	7%
300	12%	8%	10%	12%	2%	12%	11%	4%
350	5%	5%	5%	6%	0%	7%	6%	2%
400	1%	2%	2%	3%	0%	3%	2%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Além do estudo para os modelos 2D, o mesmo estudo é apresentado para os modelos 3D. As tabelas 25 a 28 apresentam os valores para os modelos 3D, ponto “A” e expoente para a lei de potência igual a $p=0,11$.

Tabela 25 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 13° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	101%	78%	84%	74%	66%	67%	93%	49%
15	67%	49%	54%	46%	38%	41%	57%	27%
20	59%	42%	48%	41%	32%	36%	48%	23%
25	54%	38%	43%	37%	28%	32%	42%	21%
30	50%	34%	39%	33%	25%	29%	37%	18%
40	44%	28%	33%	29%	21%	24%	31%	12%
50	40%	25%	29%	26%	18%	21%	27%	10%
60	38%	23%	27%	24%	17%	20%	25%	9%
70	35%	21%	24%	23%	16%	18%	22%	10%
80	34%	20%	23%	22%	15%	17%	21%	12%
90	34%	19%	23%	22%	16%	17%	21%	13%
100	32%	18%	22%	21%	15%	16%	20%	13%
125	29%	16%	19%	19%	14%	14%	17%	12%
150	26%	14%	16%	17%	12%	12%	15%	10%
200	23%	14%	15%	16%	12%	12%	14%	9%
250	17%	10%	10%	12%	10%	11%	10%	6%
300	11%	7%	7%	8%	7%	8%	7%	4%
350	6%	5%	5%	6%	5%	6%	5%	3%
400	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 26 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 20° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	89%	71%	68%	60%	43%	65%	69%	29%
15	82%	65%	63%	56%	39%	60%	61%	28%
20	76%	59%	58%	52%	35%	55%	54%	25%
25	71%	53%	53%	48%	31%	51%	49%	23%
30	68%	50%	49%	46%	29%	48%	46%	21%
40	60%	42%	42%	40%	24%	41%	39%	15%
50	56%	37%	37%	37%	22%	36%	35%	13%
60	51%	32%	32%	33%	19%	31%	31%	10%
70	49%	30%	30%	31%	18%	28%	30%	11%
80	48%	28%	29%	31%	18%	27%	29%	13%
90	45%	26%	27%	29%	17%	25%	28%	13%
100	42%	23%	25%	27%	15%	22%	25%	13%
125	38%	20%	21%	24%	14%	18%	23%	11%
150	34%	17%	18%	21%	12%	16%	20%	10%
200	27%	13%	14%	17%	10%	12%	15%	7%
250	20%	10%	11%	13%	9%	11%	12%	5%
300	13%	6%	7%	8%	6%	7%	8%	3%
350	7%	5%	5%	6%	5%	6%	6%	3%
400	1%	1%	2%	2%	1%	2%	2%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 27 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 35° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	118%	107%	112%	93%	59%	104%	97%	41%
15	108%	97%	103%	87%	53%	97%	89%	39%
20	100%	89%	94%	81%	48%	89%	83%	35%
25	92%	80%	84%	74%	42%	80%	76%	30%
30	86%	73%	77%	69%	38%	74%	71%	26%
40	76%	61%	65%	60%	32%	62%	63%	18%
50	70%	54%	57%	55%	29%	55%	58%	16%
60	63%	46%	49%	49%	24%	47%	53%	12%
70	58%	40%	43%	44%	21%	41%	48%	11%
80	53%	35%	38%	40%	19%	35%	44%	11%
90	50%	31%	34%	37%	17%	31%	40%	11%
100	46%	27%	31%	34%	15%	27%	36%	10%
125	40%	21%	25%	28%	12%	21%	30%	8%
150	36%	18%	21%	25%	11%	17%	26%	8%
200	30%	15%	18%	22%	11%	15%	21%	7%
250	23%	11%	13%	16%	10%	12%	15%	5%
300	14%	7%	9%	11%	7%	9%	10%	4%
350	6%	4%	5%	6%	4%	5%	6%	2%
400	1%	1%	2%	2%	1%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 28 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 45° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	-	-	-	-	-	-	-	-
15	176%	163%	176%	151%	98%	163%	163%	77%
20	157%	143%	155%	135%	86%	145%	148%	66%
25	139%	124%	134%	119%	74%	127%	133%	56%
30	124%	109%	118%	106%	63%	111%	120%	47%
40	103%	86%	93%	87%	49%	88%	101%	32%
50	87%	69%	75%	72%	39%	71%	86%	23%
60	77%	58%	63%	63%	33%	60%	75%	18%
70	68%	49%	53%	55%	27%	50%	65%	15%
80	61%	41%	46%	48%	23%	42%	57%	14%
90	55%	35%	40%	43%	19%	36%	50%	12%
100	51%	31%	36%	39%	17%	31%	45%	11%
125	45%	25%	29%	34%	15%	25%	37%	10%
150	41%	22%	26%	31%	14%	22%	32%	10%
200	33%	17%	20%	24%	12%	16%	23%	8%
250	25%	12%	14%	18%	10%	13%	16%	6%
300	16%	8%	10%	12%	7%	9%	11%	4%
350	8%	6%	7%	8%	6%	7%	7%	4%
400	3%	3%	3%	4%	3%	3%	4%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

As tabelas 29 a 32 apresentam os valores para os modelos 3D, ponto “A” e expoente para a lei de potência igual a $p=0,23$.

Tabela 29 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 13° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	78%	62%	71%	53%	26%	48%	110%	62%
15	66%	51%	61%	49%	13%	33%	88%	52%
20	62%	47%	58%	50%	8%	32%	79%	49%
25	58%	44%	55%	49%	7%	31%	71%	45%
30	58%	44%	55%	51%	9%	32%	69%	45%
40	53%	39%	51%	48%	8%	29%	61%	38%
50	50%	35%	47%	45%	8%	27%	54%	34%
60	47%	33%	45%	44%	8%	26%	50%	32%
70	44%	30%	41%	41%	7%	24%	45%	30%
80	41%	27%	38%	38%	6%	22%	41%	30%
90	38%	24%	35%	36%	6%	20%	38%	29%
100	37%	23%	34%	35%	6%	19%	36%	29%
125	31%	19%	29%	30%	4%	16%	30%	23%
150	27%	16%	25%	26%	4%	14%	25%	20%
200	19%	11%	18%	20%	2%	11%	17%	12%
250	13%	7%	11%	12%	0%	8%	11%	7%
300	7%	5%	7%	7%	-1%	7%	7%	4%
350	3%	2%	3%	3%	-2%	4%	3%	1%
400	1%	1%	1%	1%	-1%	2%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 30 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 20° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	103%	86%	88%	70%	51%	77%	123%	70%
15	85%	69%	74%	63%	33%	55%	97%	56%
20	81%	65%	71%	64%	27%	53%	88%	53%
25	79%	62%	68%	64%	26%	52%	83%	51%
30	76%	58%	65%	63%	25%	50%	78%	48%
40	69%	51%	59%	59%	22%	45%	68%	39%
50	63%	45%	53%	55%	19%	40%	61%	34%
60	58%	39%	48%	50%	17%	35%	55%	29%
70	53%	34%	43%	46%	15%	31%	50%	28%
80	50%	31%	40%	44%	13%	28%	46%	27%
90	48%	29%	38%	42%	13%	26%	43%	27%
100	43%	25%	34%	37%	10%	22%	38%	24%
125	37%	19%	28%	32%	8%	18%	32%	20%
150	31%	15%	24%	27%	6%	14%	27%	16%
200	22%	10%	17%	20%	3%	10%	18%	9%
250	15%	6%	10%	12%	1%	7%	12%	5%
300	9%	4%	6%	7%	-1%	7%	7%	2%
350	4%	2%	3%	4%	-1%	4%	4%	1%
400	1%	1%	1%	2%	-1%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 31 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 35° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	150%	140%	156%	120%	80%	136%	179%	100%
15	143%	131%	148%	124%	68%	119%	166%	95%
20	129%	117%	134%	117%	55%	108%	148%	83%
25	119%	106%	121%	110%	49%	99%	136%	74%
30	110%	95%	111%	103%	44%	90%	125%	66%
40	95%	78%	94%	91%	36%	75%	107%	51%
50	81%	64%	78%	78%	28%	62%	92%	40%
60	71%	53%	67%	69%	22%	52%	80%	33%
70	65%	46%	60%	63%	19%	45%	73%	30%
80	57%	38%	51%	55%	15%	37%	63%	26%
90	52%	33%	46%	50%	13%	33%	57%	25%
100	49%	30%	42%	47%	11%	29%	53%	23%
125	40%	22%	33%	38%	7%	21%	42%	17%
150	34%	17%	28%	33%	5%	17%	34%	15%
200	24%	10%	19%	23%	2%	11%	22%	8%
250	17%	7%	13%	16%	1%	9%	15%	5%
300	10%	5%	7%	9%	0%	7%	9%	2%
350	4%	3%	4%	5%	-1%	5%	5%	1%
400	1%	1%	1%	2%	-1%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 32 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “A”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 45° - 3D - Ponto A								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	236%	224%	254%	200%	137%	221%	289%	160%
15	205%	192%	221%	185%	107%	178%	251%	136%
20	178%	163%	190%	166%	84%	154%	219%	114%
25	155%	139%	163%	148%	71%	133%	193%	95%
30	141%	124%	147%	136%	63%	120%	176%	84%
40	113%	96%	116%	111%	46%	93%	143%	60%
50	91%	73%	91%	90%	33%	72%	116%	43%
60	77%	58%	74%	76%	25%	57%	97%	33%
70	67%	47%	63%	66%	19%	47%	83%	27%
80	58%	38%	53%	57%	14%	38%	71%	24%
90	52%	32%	46%	51%	10%	32%	62%	21%
100	51%	31%	45%	50%	11%	31%	59%	22%
125	41%	21%	34%	40%	6%	21%	45%	16%
150	35%	17%	28%	34%	5%	17%	36%	13%
200	25%	11%	20%	25%	2%	11%	23%	8%
250	18%	8%	13%	17%	1%	9%	15%	5%
300	10%	4%	7%	9%	-1%	7%	8%	1%
350	4%	2%	4%	5%	-1%	4%	4%	0%
400	-1%	0%	0%	1%	-2%	0%	0%	-1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

5.2.5.2 Variação percentual para o ponto “B”

Da mesma forma que o ponto “A”, o estudo é realizado para os modelos 2D e 3D para o ponto “B”. Inicialmente serão apresentadas as tabelas para os modelos 2D (tabelas 33 a 36), o expoente da lei de potência é igual a $p=0,11$.

Tabela 33 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 13° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	-	-	-	-	-	-	-	-
15	50%	58%	35%	32%	31%	65%	64%	23%
20	40%	48%	27%	25%	23%	55%	50%	17%
25	35%	42%	22%	21%	20%	49%	42%	13%
30	33%	38%	19%	19%	18%	45%	38%	10%
40	31%	34%	17%	18%	17%	42%	33%	7%
50	30%	31%	15%	17%	17%	39%	29%	6%
60	30%	30%	14%	17%	18%	37%	27%	5%
70	30%	28%	13%	17%	18%	34%	25%	6%
80	29%	25%	12%	17%	18%	32%	23%	7%
90	30%	24%	13%	17%	18%	30%	23%	9%
100	30%	23%	13%	17%	18%	29%	21%	9%
125	29%	20%	12%	17%	19%	25%	19%	9%
150	28%	18%	12%	17%	18%	22%	17%	9%
200	24%	14%	10%	16%	16%	17%	14%	6%
250	19%	10%	8%	12%	14%	13%	11%	5%
300	13%	7%	6%	9%	10%	9%	8%	4%
350	6%	4%	4%	6%	6%	6%	5%	2%
400	2%	2%	2%	3%	3%	3%	3%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 34 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 20° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	90%	84%	68%	60%	39%	92%	121%	35%
15	56%	50%	38%	32%	15%	58%	74%	13%
20	48%	41%	30%	26%	9%	49%	60%	7%
25	47%	39%	28%	26%	9%	48%	56%	6%
30	47%	38%	26%	25%	9%	46%	52%	5%
40	47%	36%	25%	26%	11%	44%	47%	2%
50	46%	33%	22%	25%	11%	41%	42%	1%
60	46%	31%	20%	25%	12%	39%	39%	0%
70	47%	30%	20%	26%	14%	38%	37%	3%
80	47%	28%	19%	26%	14%	35%	34%	4%
90	46%	26%	18%	25%	14%	32%	31%	5%
100	45%	24%	17%	24%	14%	30%	29%	5%
125	45%	22%	17%	24%	16%	27%	26%	6%
150	41%	19%	15%	22%	16%	22%	22%	6%
200	35%	14%	12%	19%	15%	17%	16%	4%
250	28%	11%	10%	15%	14%	14%	13%	4%
300	17%	7%	7%	10%	9%	9%	9%	3%
350	7%	4%	4%	6%	5%	5%	5%	1%
400	-2%	-1%	-1%	0%	0%	-1%	-1%	-2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 35 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 35° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	66%	53%	49%	33%	9%	59%	144%	8%
15	53%	40%	36%	24%	2%	47%	111%	0%
20	52%	39%	35%	24%	2%	47%	100%	-2%
25	54%	39%	34%	25%	3%	47%	93%	-2%
30	56%	40%	34%	27%	6%	49%	88%	-1%
40	57%	39%	32%	28%	7%	47%	77%	-4%
50	58%	37%	30%	29%	9%	46%	68%	-4%
60	57%	35%	27%	29%	10%	43%	60%	-4%
70	57%	33%	26%	29%	11%	41%	54%	-3%
80	56%	31%	24%	28%	11%	38%	48%	-1%
90	55%	29%	23%	28%	12%	36%	44%	0%
100	54%	27%	22%	27%	12%	33%	39%	1%
125	51%	23%	19%	25%	13%	28%	32%	1%
150	48%	20%	17%	24%	13%	24%	26%	2%
200	41%	17%	15%	21%	14%	19%	19%	3%
250	31%	12%	11%	16%	12%	15%	13%	3%
300	19%	7%	8%	11%	8%	10%	9%	2%
350	7%	4%	4%	6%	5%	5%	5%	1%
400	1%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 36 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 45° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	70%	52%	48%	32%	6%	58%	189%	4%
15	60%	42%	38%	25%	1%	49%	149%	-3%
20	63%	44%	40%	29%	4%	53%	136%	-3%
25	64%	44%	39%	30%	5%	53%	123%	-3%
30	65%	44%	38%	31%	6%	53%	112%	-4%
40	68%	45%	37%	34%	10%	53%	97%	-5%
50	69%	43%	35%	34%	11%	51%	84%	-5%
60	67%	40%	32%	33%	11%	48%	71%	-5%
70	68%	39%	31%	34%	13%	47%	64%	-2%
80	67%	36%	29%	34%	14%	44%	57%	0%
90	67%	36%	29%	34%	15%	42%	52%	2%
100	66%	33%	28%	33%	15%	39%	47%	3%
125	62%	29%	24%	31%	16%	34%	37%	4%
150	57%	24%	22%	28%	15%	28%	29%	4%
200	48%	20%	18%	25%	15%	22%	22%	5%
250	36%	14%	14%	18%	13%	17%	15%	4%
300	22%	9%	9%	12%	9%	11%	10%	3%
350	10%	6%	7%	9%	7%	7%	7%	3%
400	2%	3%	3%	4%	3%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

As tabelas 37 a 40 apresentam as variações para o vento com expoente da lei de potência igual a $p=0,23$.

Tabela 37 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 13° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	37%	46%	29%	19%	2%	51%	90%	21%
15	28%	35%	21%	17%	-8%	35%	69%	14%
20	23%	29%	17%	15%	-13%	31%	57%	9%
25	22%	27%	15%	15%	-12%	30%	51%	8%
30	21%	25%	15%	16%	-11%	29%	46%	7%
40	22%	24%	16%	18%	-8%	29%	42%	4%
50	23%	23%	16%	19%	-6%	29%	39%	4%
60	24%	22%	16%	20%	-4%	28%	36%	4%
70	24%	20%	15%	21%	-2%	27%	34%	5%
80	24%	19%	15%	21%	-1%	25%	31%	7%
90	24%	18%	15%	21%	0%	24%	29%	8%
100	24%	17%	15%	21%	1%	23%	28%	9%
125	23%	14%	14%	20%	2%	19%	23%	7%
150	21%	11%	13%	19%	3%	16%	20%	7%
200	17%	7%	10%	16%	2%	11%	14%	4%
250	12%	5%	7%	11%	1%	8%	9%	2%
300	7%	3%	4%	7%	0%	7%	5%	0%
350	2%	2%	2%	4%	-1%	4%	3%	0%
400	0%	1%	1%	1%	-1%	2%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 38 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 20° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	49%	44%	38%	24%	7%	51%	113%	31%
15	36%	30%	26%	19%	-6%	31%	83%	18%
20	34%	27%	24%	20%	-9%	30%	73%	15%
25	33%	26%	22%	21%	-9%	29%	66%	13%
30	34%	25%	22%	22%	-8%	30%	62%	12%
40	37%	25%	23%	26%	-4%	31%	57%	9%
50	40%	26%	25%	29%	-1%	33%	55%	10%
60	40%	24%	23%	30%	1%	31%	50%	9%
70	39%	22%	21%	29%	1%	28%	45%	8%
80	40%	21%	22%	30%	3%	28%	42%	10%
90	39%	19%	20%	28%	3%	25%	38%	10%
100	39%	18%	20%	28%	4%	24%	36%	11%
125	37%	15%	18%	27%	5%	21%	30%	9%
150	34%	12%	16%	24%	5%	17%	25%	8%
200	28%	8%	13%	19%	4%	12%	17%	5%
250	20%	5%	8%	13%	3%	8%	11%	2%
300	12%	3%	5%	8%	1%	7%	6%	1%
350	4%	2%	3%	5%	1%	5%	4%	0%
400	2%	2%	3%	4%	2%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 39 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 35° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	ALJ	NBCC	JH	LSD
10	199%	176%	183%	138%	95%	189%	443%	141%
15	78%	63%	67%	48%	12%	64%	196%	40%
20	52%	38%	42%	30%	-7%	41%	137%	17%
25	50%	35%	38%	30%	-7%	39%	121%	13%
30	52%	36%	38%	33%	-5%	41%	114%	12%
40	56%	37%	40%	38%	0%	43%	102%	10%
50	59%	37%	39%	40%	3%	44%	92%	10%
60	60%	36%	39%	42%	5%	44%	83%	10%
70	61%	35%	37%	43%	7%	42%	76%	11%
80	61%	33%	37%	43%	8%	41%	69%	13%
90	61%	32%	36%	43%	10%	40%	64%	14%
100	59%	30%	34%	41%	10%	37%	58%	14%
125	60%	29%	34%	42%	13%	35%	51%	16%
150	45%	17%	22%	29%	6%	22%	32%	7%
200	35%	11%	17%	23%	4%	15%	21%	4%
250	25%	7%	11%	16%	3%	11%	13%	2%
300	15%	4%	7%	9%	1%	9%	8%	1%
350	5%	3%	4%	5%	0%	5%	4%	0%
400	0%	1%	1%	2%	0%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 40 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 45° - 2D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	ALJ	NBCC	JH	LSD
10	114%	91%	96%	65%	32%	100%	347%	61%
15	57%	39%	43%	27%	-6%	40%	195%	14%
20	55%	36%	40%	28%	-10%	39%	167%	10%
25	57%	37%	40%	32%	-7%	41%	152%	9%
30	61%	39%	42%	36%	-4%	45%	142%	9%
40	67%	42%	45%	43%	1%	49%	125%	9%
50	69%	41%	44%	45%	4%	49%	109%	8%
60	70%	41%	43%	47%	6%	48%	97%	9%
70	71%	40%	42%	48%	8%	47%	87%	11%
80	70%	37%	40%	47%	9%	45%	77%	12%
90	70%	36%	40%	47%	11%	44%	70%	14%
100	69%	34%	39%	46%	11%	42%	64%	15%
125	65%	30%	35%	43%	12%	37%	52%	15%
150	60%	26%	32%	40%	13%	32%	42%	15%
200	48%	20%	26%	32%	11%	24%	29%	11%
250	36%	15%	19%	24%	10%	19%	21%	9%
300	25%	12%	15%	18%	8%	17%	15%	8%
350	14%	10%	11%	13%	7%	13%	11%	7%
400	7%	8%	9%	9%	7%	9%	9%	7%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Além do estudo para os modelos 2D, o mesmo estudo é apresentado para os modelos 3D. As tabelas 41 a 44 apresentam os valores para os modelos 3D, ponto “B” e para as inclinações 13°, 20°, 35° e 45°. Os dados apresentados nas tabelas 41 a 44 referem-se ao vento com expoente da lei de potência $p=0,11$.

Tabela 41 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 13° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	64%	56%	46%	43%	42%	56%	84%	32%
15	53%	45%	38%	35%	34%	47%	67%	26%
20	51%	42%	36%	34%	32%	44%	61%	25%
25	50%	40%	35%	34%	32%	43%	57%	25%
30	49%	38%	33%	33%	32%	41%	54%	24%
40	48%	35%	32%	33%	32%	38%	50%	21%
50	48%	33%	30%	33%	32%	36%	47%	20%
60	47%	31%	29%	33%	33%	34%	44%	19%
70	48%	30%	28%	33%	34%	32%	42%	20%
80	48%	29%	29%	34%	35%	31%	41%	23%
90	47%	28%	28%	33%	34%	29%	39%	23%
100	46%	26%	27%	33%	34%	27%	37%	23%
125	46%	25%	27%	33%	34%	25%	35%	23%
150	44%	23%	26%	32%	33%	24%	32%	22%
200	39%	21%	23%	29%	30%	21%	27%	19%
250	32%	17%	19%	24%	26%	19%	22%	16%
300	24%	16%	17%	20%	21%	17%	19%	14%
350	15%	13%	14%	16%	16%	14%	15%	12%
400	10%	10%	11%	11%	12%	10%	11%	10%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 42 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 20° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	53%	32%	36%	29%	12%	33%	78%	9%
15	51%	29%	33%	28%	11%	31%	69%	9%
20	52%	29%	33%	29%	12%	31%	64%	9%
25	52%	28%	32%	30%	13%	31%	61%	9%
30	53%	28%	32%	31%	14%	31%	59%	10%
40	55%	27%	31%	33%	17%	30%	55%	8%
50	56%	26%	30%	33%	18%	28%	51%	8%
60	55%	24%	28%	33%	19%	26%	47%	7%
70	55%	23%	27%	33%	20%	25%	45%	8%
80	55%	21%	26%	33%	21%	23%	42%	10%
90	54%	20%	25%	32%	21%	21%	39%	11%
100	54%	19%	25%	32%	22%	21%	38%	12%
125	52%	18%	23%	31%	23%	18%	33%	12%
150	49%	16%	21%	29%	22%	16%	29%	11%
200	40%	13%	17%	24%	19%	13%	21%	9%
250	31%	10%	13%	18%	16%	11%	15%	6%
300	19%	7%	9%	12%	11%	8%	10%	4%
350	9%	5%	6%	8%	8%	6%	7%	4%
400	2%	3%	3%	4%	4%	3%	4%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 43 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 35° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	ALJ	NBCC	JH	LSD
10	51%	23%	35%	21%	-1%	24%	122%	-2%
15	54%	26%	38%	25%	3%	28%	113%	1%
20	57%	27%	39%	28%	5%	30%	106%	1%
25	59%	28%	38%	30%	7%	30%	99%	1%
30	60%	28%	38%	31%	9%	31%	93%	1%
40	63%	27%	37%	33%	11%	31%	83%	0%
50	67%	29%	37%	36%	15%	32%	77%	1%
60	67%	28%	36%	37%	17%	30%	70%	2%
70	67%	26%	34%	37%	18%	29%	64%	3%
80	66%	25%	32%	37%	19%	27%	58%	5%
90	66%	24%	31%	36%	19%	25%	53%	7%
100	63%	22%	29%	35%	19%	23%	48%	7%
125	60%	19%	26%	33%	19%	20%	39%	7%
150	57%	18%	25%	31%	20%	18%	34%	9%
200	47%	15%	19%	26%	18%	15%	24%	7%
250	46%	20%	24%	28%	24%	21%	26%	14%
300	22%	7%	10%	13%	10%	8%	11%	4%
350	10%	5%	7%	9%	7%	6%	8%	3%
400	2%	2%	3%	4%	3%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 44 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 45° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	ALJ	NBCC	JH	LSD
10	-	-	-	-	-	-	-	-
15	62%	28%	40%	27%	2%	30%	153%	-2%
20	68%	32%	44%	32%	6%	34%	143%	0%
25	69%	32%	43%	34%	8%	35%	131%	0%
30	71%	32%	43%	36%	10%	35%	120%	0%
40	73%	32%	41%	38%	13%	35%	103%	-2%
50	73%	30%	39%	38%	14%	33%	89%	-2%
60	75%	30%	38%	40%	17%	33%	80%	-1%
70	75%	29%	36%	40%	18%	31%	71%	1%
80	73%	26%	34%	38%	18%	28%	62%	3%
90	71%	25%	32%	37%	18%	26%	56%	5%
100	71%	24%	32%	37%	19%	25%	51%	6%
125	67%	21%	28%	35%	19%	22%	41%	7%
150	60%	18%	24%	31%	18%	18%	33%	7%
200	49%	14%	19%	25%	16%	14%	22%	5%
250	37%	11%	15%	19%	14%	13%	16%	5%
300	23%	7%	10%	13%	10%	9%	10%	3%
350	10%	5%	6%	8%	6%	5%	6%	2%
400	2%	2%	3%	3%	3%	2%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

As tabelas 45 a 48 apresentam os valores para os modelos 3D, ponto “B” e para as inclinações 13°, 20°, 35° e 45° e referem-se ao vento com expoente da lei de potência $p=0,23$.

Tabela 45 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 13° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	33%	28%	25%	16%	15%	28%	85%	33%
15	27%	21%	21%	16%	5%	17%	68%	27%
20	26%	19%	20%	18%	2%	16%	61%	25%
25	26%	18%	20%	20%	3%	16%	56%	24%
30	27%	18%	20%	21%	4%	17%	53%	23%
40	28%	16%	21%	24%	6%	17%	49%	20%
50	29%	15%	21%	25%	8%	16%	45%	19%
60	29%	14%	20%	26%	9%	15%	42%	17%
70	29%	13%	20%	26%	10%	14%	39%	18%
80	30%	13%	20%	26%	11%	14%	37%	19%
90	29%	11%	19%	26%	11%	12%	34%	19%
100	29%	11%	19%	26%	12%	12%	33%	19%
125	27%	8%	17%	24%	11%	9%	27%	16%
150	24%	6%	15%	22%	10%	7%	23%	14%
200	18%	3%	11%	17%	7%	4%	15%	8%
250	13%	2%	7%	11%	4%	4%	10%	4%
300	8%	2%	5%	7%	3%	5%	6%	2%
350	3%	1%	2%	4%	1%	3%	3%	1%
400	0%	0%	1%	2%	0%	1%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 46 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 20° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	35%	16%	25%	12%	-3%	17%	92%	18%
15	33%	13%	23%	16%	-8%	10%	79%	15%
20	36%	15%	26%	21%	-8%	13%	75%	17%
25	38%	16%	27%	25%	-5%	15%	72%	17%
30	40%	16%	27%	28%	-3%	16%	69%	17%
40	41%	15%	27%	30%	-1%	16%	62%	13%
50	43%	15%	27%	32%	1%	16%	58%	12%
60	43%	14%	26%	33%	3%	15%	53%	11%
70	44%	13%	26%	34%	5%	15%	50%	12%
80	44%	12%	25%	33%	6%	13%	46%	13%
90	43%	11%	24%	33%	7%	12%	43%	14%
100	43%	10%	23%	32%	7%	11%	40%	14%
125	40%	8%	21%	29%	8%	9%	33%	12%
150	37%	6%	18%	26%	7%	7%	27%	10%
200	29%	4%	14%	21%	6%	5%	18%	6%
250	20%	2%	9%	14%	3%	4%	12%	3%
300	12%	2%	6%	9%	2%	5%	7%	1%
350	5%	1%	3%	5%	1%	3%	4%	0%
400	0%	1%	1%	2%	0%	1%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 47 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 35° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	31%	7%	23%	4%	-15%	8%	137%	5%
15	34%	10%	26%	12%	-16%	6%	124%	6%
20	38%	12%	29%	18%	-15%	10%	116%	6%
25	42%	13%	30%	23%	-12%	12%	109%	6%
30	45%	15%	32%	26%	-9%	15%	103%	7%
40	49%	16%	34%	32%	-5%	17%	93%	5%
50	52%	17%	33%	34%	-2%	18%	83%	5%
60	53%	16%	32%	35%	0%	17%	75%	4%
70	53%	15%	31%	35%	2%	16%	67%	5%
80	53%	14%	30%	36%	3%	15%	61%	7%
90	52%	13%	28%	35%	3%	14%	55%	8%
100	50%	11%	26%	33%	4%	13%	49%	8%
125	46%	9%	22%	30%	4%	9%	38%	6%
150	42%	7%	20%	27%	4%	7%	30%	5%
200	33%	4%	15%	21%	3%	5%	19%	3%
250	23%	2%	9%	14%	1%	4%	11%	1%
300	13%	1%	5%	8%	0%	4%	6%	-1%
350	4%	1%	3%	4%	-1%	3%	3%	-1%
400	0%	0%	1%	2%	-1%	1%	1%	-1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 48 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “B”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 45° - 3D - Ponto B								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	37%	9%	25%	5%	-15%	10%	187%	3%
15	43%	13%	30%	16%	-15%	10%	169%	5%
20	49%	17%	35%	24%	-13%	15%	157%	6%
25	53%	18%	36%	28%	-10%	17%	144%	6%
30	55%	20%	37%	32%	-7%	19%	133%	6%
40	59%	20%	38%	36%	-4%	21%	114%	3%
50	59%	19%	36%	37%	-2%	20%	97%	2%
60	61%	19%	36%	39%	1%	21%	86%	3%
70	61%	18%	34%	39%	2%	19%	75%	4%
80	60%	17%	33%	39%	3%	18%	67%	6%
90	58%	15%	30%	37%	3%	16%	59%	6%
100	57%	14%	29%	36%	4%	15%	53%	7%
125	54%	12%	26%	34%	5%	13%	41%	7%
150	48%	9%	22%	29%	4%	9%	31%	6%
200	38%	6%	17%	23%	3%	7%	20%	4%
250	26%	4%	10%	15%	1%	5%	12%	1%
300	15%	2%	6%	8%	0%	5%	6%	-1%
350	5%	1%	3%	5%	0%	3%	3%	-1%
400	0%	0%	1%	2%	-1%	1%	1%	-1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

5.2.5.3 Variação percentual para o ponto “C”

A variação percentual entre os dados experimentais do ponto em análise e as normas e modelos são detalhadas a seguir. Inicialmente serão apresentadas as tabelas para os modelos 2D (tabelas 49 a 52) e o vento com expoente da lei de potência é igual a $p=0,11$.

Tabela 49 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 13° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	-	-	-	-	-	-	-	-
15	882%	816%	806%	787%	689%	785%	824%	647%
20	737%	683%	678%	661%	575%	662%	679%	548%
25	594%	550%	544%	534%	462%	536%	541%	443%
30	454%	419%	415%	408%	350%	409%	408%	336%
40	280%	255%	252%	250%	210%	250%	246%	197%
50	160%	143%	140%	140%	114%	140%	136%	105%
60	96%	82%	80%	81%	62%	81%	77%	55%
70	62%	51%	49%	51%	42%	50%	47%	31%
80	40%	30%	29%	31%	29%	29%	27%	16%
90	33%	24%	22%	25%	27%	23%	21%	13%
100	29%	20%	19%	21%	26%	19%	17%	10%
125	24%	15%	14%	17%	25%	15%	13%	7%
150	21%	13%	12%	15%	24%	12%	11%	6%
200	18%	11%	10%	13%	20%	11%	9%	5%
250	14%	8%	7%	9%	14%	9%	7%	3%
300	10%	6%	6%	7%	10%	8%	6%	3%
350	4%	3%	3%	4%	5%	4%	3%	1%
400	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 50 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 20° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	968%	941%	845%	844%	671%	932%	853%	628%
15	926%	900%	814%	816%	645%	901%	803%	619%
20	874%	847%	771%	775%	610%	854%	751%	593%
25	888%	857%	780%	791%	623%	868%	759%	609%
30	899%	865%	790%	804%	635%	878%	768%	621%
40	891%	849%	779%	800%	635%	865%	760%	610%
50	752%	708%	650%	675%	536%	722%	640%	515%
60	491%	456%	418%	439%	345%	466%	414%	330%
70	304%	278%	254%	270%	207%	284%	253%	201%
80	175%	156%	140%	152%	122%	159%	141%	110%
90	99%	84%	74%	82%	71%	86%	75%	55%
100	63%	50%	43%	49%	47%	52%	43%	29%
125	32%	21%	16%	22%	29%	22%	17%	6%
150	26%	16%	12%	17%	29%	16%	13%	4%
200	21%	12%	9%	14%	26%	12%	11%	3%
250	16%	8%	7%	10%	20%	10%	8%	2%
300	10%	5%	5%	7%	13%	7%	6%	1%
350	5%	4%	4%	5%	8%	5%	4%	1%
400	2%	2%	2%	3%	4%	3%	3%	1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 51 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 35° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	1051%	1108%	1022%	957%	719%	1129%	944%	648%
15	1064%	1118%	1032%	979%	733%	1151%	956%	674%
20	1094%	1143%	1057%	1012%	759%	1184%	988%	703%
25	1096%	1137%	1046%	1016%	764%	1182%	995%	709%
30	1112%	1145%	1054%	1033%	780%	1193%	1015%	724%
40	1112%	1127%	1037%	1035%	787%	1177%	1024%	717%
50	1143%	1141%	1048%	1065%	818%	1191%	1059%	747%
60	1057%	1039%	955%	984%	761%	1084%	982%	695%
70	804%	780%	718%	747%	578%	813%	747%	537%
80	418%	398%	366%	385%	292%	416%	385%	276%
90	175%	162%	146%	157%	109%	170%	157%	104%
100	75%	66%	57%	64%	35%	71%	64%	33%
125	28%	20%	14%	20%	1%	22%	19%	-1%
150	24%	15%	11%	16%	14%	17%	15%	-2%
200	18%	9%	7%	12%	19%	10%	10%	-3%
250	15%	7%	6%	10%	17%	9%	8%	-1%
300	9%	4%	4%	6%	11%	6%	5%	-1%
350	4%	3%	3%	5%	7%	4%	4%	0%
400	1%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 52 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 45° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	1248%	1331%	1253%	1146%	852%	1368%	1168%	746%
15	1193%	1268%	1191%	1105%	818%	1315%	1133%	728%
20	1151%	1216%	1142%	1071%	793%	1269%	1108%	710%
25	1171%	1227%	1146%	1093%	812%	1285%	1140%	728%
30	1102%	1146%	1068%	1030%	766%	1203%	1082%	687%
40	1089%	1112%	1033%	1018%	764%	1170%	1078%	673%
50	1061%	1066%	986%	992%	752%	1121%	1051%	665%
60	1062%	1050%	971%	992%	760%	1102%	1049%	674%
70	1011%	986%	914%	944%	729%	1033%	993%	661%
80	899%	864%	805%	838%	652%	904%	875%	606%
90	516%	488%	456%	478%	367%	510%	497%	345%
100	86%	76%	67%	74%	42%	82%	78%	37%
125	36%	26%	21%	27%	11%	30%	29%	3%
150	28%	18%	14%	20%	19%	20%	19%	-1%
200	24%	14%	12%	17%	23%	15%	14%	0%
250	19%	10%	9%	13%	18%	12%	10%	1%
300	13%	7%	7%	10%	12%	9%	8%	2%
350	6%	4%	5%	6%	7%	6%	5%	1%
400	1%	2%	2%	3%	3%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

As tabelas para os modelos 2D (tabelas 53 a 56) e o vento com expoente da lei de potência é igual a $p=0,23$, serão apresentadas a seguir.

Tabela 53 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 13° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	587%	482%	485%	440%	382%	444%	620%	454%
15	480%	402%	411%	389%	299%	353%	497%	383%
20	365%	308%	319%	309%	217%	275%	374%	294%
25	278%	235%	245%	242%	163%	212%	282%	224%
30	207%	174%	183%	183%	117%	157%	209%	165%
40	121%	99%	107%	108%	60%	89%	120%	89%
50	77%	60%	67%	70%	31%	54%	75%	52%
60	51%	38%	44%	47%	14%	33%	49%	31%
70	39%	27%	33%	36%	12%	24%	37%	23%
80	33%	22%	28%	31%	13%	19%	31%	20%
90	30%	19%	25%	29%	15%	17%	28%	19%
100	27%	18%	24%	27%	17%	16%	25%	18%
125	23%	14%	20%	24%	18%	14%	21%	15%
150	21%	13%	19%	22%	18%	12%	18%	14%
200	15%	9%	14%	17%	13%	10%	13%	9%
250	10%	7%	9%	12%	8%	8%	9%	5%
300	6%	4%	6%	7%	4%	7%	6%	3%
350	3%	2%	3%	4%	1%	5%	3%	1%
400	1%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 54 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 20° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	631%	624%	579%	540%	421%	609%	703%	513%
15	597%	587%	554%	541%	378%	550%	640%	489%
20	588%	575%	548%	549%	360%	548%	615%	482%
25	580%	563%	539%	551%	359%	543%	596%	474%
30	566%	546%	527%	544%	353%	532%	574%	460%
40	518%	494%	483%	504%	327%	487%	516%	409%
50	384%	360%	355%	376%	238%	359%	378%	298%
60	244%	224%	222%	239%	143%	225%	237%	182%
70	148%	132%	132%	145%	77%	133%	142%	106%
80	90%	76%	77%	88%	45%	78%	85%	61%
90	60%	48%	49%	58%	30%	49%	55%	37%
100	44%	32%	34%	42%	23%	34%	39%	25%
125	31%	20%	23%	30%	22%	21%	27%	15%
150	27%	16%	19%	26%	23%	17%	22%	12%
200	20%	11%	15%	20%	20%	13%	16%	8%
250	14%	8%	10%	14%	14%	10%	11%	5%
300	9%	5%	6%	8%	9%	8%	7%	2%
350	4%	3%	3%	4%	4%	5%	4%	1%
400	0%	1%	1%	1%	1%	2%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 55 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 35° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	579%	618%	595%	517%	377%	628%	658%	443%
15	578%	612%	594%	546%	358%	596%	642%	444%
20	554%	582%	568%	539%	332%	576%	609%	423%
25	571%	593%	578%	565%	347%	595%	622%	434%
30	565%	581%	569%	565%	347%	588%	613%	427%
40	571%	577%	570%	577%	357%	590%	615%	420%
50	581%	577%	572%	590%	370%	595%	622%	428%
60	550%	537%	533%	558%	354%	555%	584%	403%
70	466%	448%	448%	474%	300%	465%	493%	346%
80	320%	302%	304%	325%	200%	315%	336%	238%
90	190%	175%	177%	193%	109%	184%	199%	137%
100	112%	100%	103%	114%	55%	106%	118%	76%
125	39%	29%	31%	39%	4%	32%	40%	16%
150	29%	19%	22%	29%	13%	22%	29%	10%
200	22%	13%	17%	23%	18%	16%	20%	6%
250	16%	9%	12%	16%	14%	12%	14%	4%
300	10%	6%	8%	10%	9%	10%	9%	3%
350	4%	4%	4%	6%	4%	6%	5%	1%
400	1%	1%	1%	2%	1%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 56 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 2D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 45° - 2D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	-	-	-	-	-	-	-	-
15	967%	1031%	1022%	924%	616%	1016%	1128%	725%
20	978%	1032%	1028%	960%	606%	1034%	1139%	730%
25	935%	977%	970%	931%	584%	990%	1088%	693%
30	921%	953%	948%	926%	581%	973%	1070%	679%
40	906%	920%	921%	919%	581%	950%	1046%	652%
50	887%	884%	886%	903%	577%	918%	1013%	639%
60	908%	891%	893%	925%	600%	928%	1022%	656%
70	838%	810%	816%	853%	560%	846%	931%	618%
80	578%	550%	557%	588%	382%	576%	635%	432%
90	262%	243%	248%	266%	160%	257%	287%	189%
100	109%	96%	100%	111%	52%	104%	121%	69%
125	32%	22%	26%	33%	3%	27%	36%	8%
150	28%	17%	22%	28%	14%	21%	29%	7%
200	23%	13%	18%	23%	18%	16%	21%	6%
250	17%	9%	12%	16%	12%	12%	14%	4%
300	10%	6%	7%	10%	6%	10%	8%	2%
350	4%	3%	4%	6%	2%	6%	4%	1%
400	1%	2%	2%	3%	1%	3%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Além do estudo para os modelos 2D, o mesmo estudo é apresentado para os modelos 3D. As tabelas 57 a 60 apresentam os valores para os modelos 3D, ponto “B” e expoente da lei de potência igual a $p=0,11$.

Tabela 57 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 13° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	564%	487%	507%	493%	431%	450%	537%	389%
15	585%	509%	532%	519%	450%	477%	544%	421%
20	572%	499%	525%	511%	442%	472%	525%	420%
25	570%	498%	521%	512%	442%	473%	518%	424%
30	577%	505%	529%	521%	450%	482%	521%	433%
40	521%	454%	476%	472%	408%	436%	465%	385%
50	392%	339%	354%	355%	304%	326%	346%	288%
60	228%	192%	201%	204%	171%	184%	196%	160%
70	117%	94%	99%	102%	90%	89%	96%	76%
80	64%	46%	50%	53%	50%	43%	48%	36%
90	41%	26%	30%	32%	34%	23%	28%	19%
100	33%	19%	23%	25%	30%	17%	21%	14%
125	28%	15%	18%	20%	29%	13%	16%	10%
150	25%	13%	16%	19%	28%	12%	14%	10%
200	22%	13%	14%	17%	24%	12%	13%	8%
250	17%	10%	10%	13%	18%	11%	10%	6%
300	11%	7%	7%	9%	12%	8%	7%	4%
350	5%	4%	4%	5%	6%	5%	4%	3%
400	3%	3%	3%	3%	4%	3%	3%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 58 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 20° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	520%	459%	449%	448%	348%	439%	453%	322%
15	520%	459%	452%	454%	350%	445%	446%	335%
20	543%	479%	476%	478%	369%	467%	462%	358%
25	552%	485%	481%	488%	378%	475%	467%	368%
30	588%	515%	513%	522%	406%	506%	497%	397%
40	550%	476%	476%	490%	382%	470%	463%	365%
50	323%	273%	273%	285%	216%	269%	267%	206%
60	148%	118%	118%	127%	87%	116%	116%	81%
70	71%	49%	49%	56%	30%	48%	49%	27%
80	44%	25%	26%	32%	16%	24%	26%	10%
90	38%	20%	21%	27%	19%	19%	21%	8%
100	36%	18%	19%	25%	23%	16%	20%	8%
125	34%	16%	18%	23%	31%	15%	19%	8%
150	30%	14%	16%	21%	33%	13%	17%	7%
200	25%	12%	13%	18%	30%	11%	14%	6%
250	21%	10%	11%	14%	25%	11%	12%	5%
300	14%	8%	8%	11%	17%	9%	9%	5%
350	7%	5%	5%	6%	10%	5%	6%	3%
400	3%	3%	3%	4%	5%	3%	4%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 59 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 35° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	495%	466%	480%	447%	324%	459%	440%	287%
15	518%	486%	501%	473%	342%	483%	461%	311%
20	540%	503%	520%	496%	360%	503%	483%	330%
25	563%	521%	536%	519%	379%	523%	507%	349%
30	580%	532%	547%	535%	393%	535%	525%	362%
40	640%	579%	594%	593%	442%	583%	586%	399%
50	497%	441%	452%	460%	341%	444%	457%	307%
60	238%	203%	209%	217%	152%	205%	216%	133%
70	102%	79%	83%	89%	52%	80%	89%	42%
80	48%	30%	33%	39%	12%	31%	39%	7%
90	36%	19%	22%	27%	4%	19%	27%	1%
100	33%	16%	19%	25%	2%	16%	24%	1%
125	31%	13%	16%	22%	3%	13%	22%	1%
150	31%	14%	17%	23%	20%	13%	21%	4%
200	26%	12%	14%	20%	27%	12%	17%	4%
250	21%	9%	11%	15%	23%	11%	13%	4%
300	13%	7%	8%	10%	15%	8%	9%	3%
350	6%	4%	5%	6%	8%	4%	5%	2%
400	3%	3%	3%	4%	4%	3%	3%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 60 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,11$.

Inclinação de 45° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	-	-	-	-	-	-	-	-
15	552%	521%	551%	508%	363%	522%	522%	317%
20	570%	534%	565%	527%	378%	538%	547%	333%
25	592%	550%	578%	549%	396%	556%	575%	351%
30	615%	566%	595%	572%	415%	574%	603%	368%
40	761%	690%	721%	710%	526%	699%	753%	460%
50	766%	683%	710%	714%	535%	692%	759%	470%
60	435%	378%	393%	402%	296%	382%	428%	256%
70	114%	89%	95%	101%	60%	91%	110%	47%
80	46%	28%	32%	37%	10%	28%	42%	3%
90	35%	18%	22%	27%	3%	18%	31%	-2%
100	34%	16%	20%	26%	3%	16%	29%	-1%
125	33%	14%	18%	24%	8%	14%	25%	0%
150	31%	13%	17%	23%	22%	13%	22%	2%
200	28%	13%	16%	21%	27%	12%	18%	4%
250	23%	10%	13%	17%	22%	12%	14%	4%
300	15%	7%	9%	12%	14%	8%	10%	3%
350	7%	4%	5%	7%	7%	5%	6%	2%
400	3%	3%	3%	4%	4%	3%	3%	2%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

As tabelas 61 a 64 apresentam os valores para os modelos 3D, ponto “B” e expoente da lei de potência igual a $p=0,23$.

Tabela 61 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 13°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 13° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	774%	606%	644%	586%	512%	546%	816%	604%
15	677%	542%	585%	556%	435%	467%	701%	547%
20	583%	472%	516%	500%	365%	414%	596%	479%
25	535%	437%	478%	473%	341%	389%	542%	444%
30	449%	368%	407%	406%	288%	330%	452%	373%
40	291%	237%	268%	270%	183%	214%	290%	235%
50	183%	146%	168%	172%	109%	131%	180%	144%
60	112%	85%	102%	106%	60%	76%	110%	84%
70	68%	48%	61%	65%	35%	41%	66%	49%
80	45%	28%	40%	44%	24%	23%	43%	31%
90	35%	20%	30%	34%	19%	15%	32%	24%
100	31%	17%	27%	31%	20%	13%	29%	22%
125	27%	14%	24%	28%	22%	12%	25%	19%
150	23%	12%	21%	25%	20%	10%	21%	16%
200	16%	8%	16%	19%	14%	8%	14%	10%
250	11%	6%	10%	13%	9%	7%	10%	6%
300	7%	4%	6%	8%	4%	7%	6%	3%
350	4%	3%	3%	4%	2%	4%	3%	1%
400	1%	1%	1%	2%	0%	2%	1%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 62 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 20°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 20° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	355%	318%	323%	298%	224%	298%	400%	282%
15	360%	320%	331%	323%	215%	286%	388%	289%
20	385%	341%	357%	357%	224%	311%	404%	310%
25	409%	361%	379%	387%	244%	334%	421%	330%
30	427%	375%	396%	409%	259%	350%	433%	343%
40	369%	319%	343%	359%	224%	302%	368%	286%
50	227%	190%	207%	222%	129%	180%	223%	169%
60	112%	87%	98%	109%	50%	81%	108%	74%
70	61%	41%	51%	59%	15%	38%	57%	34%
80	43%	25%	34%	41%	9%	22%	39%	21%
90	38%	20%	29%	36%	12%	18%	34%	19%
100	35%	18%	26%	34%	16%	15%	31%	18%
125	33%	16%	24%	32%	24%	14%	28%	16%
150	27%	11%	19%	26%	23%	10%	22%	12%
200	20%	8%	15%	20%	20%	8%	16%	8%
250	14%	6%	10%	14%	14%	7%	11%	5%
300	9%	4%	6%	8%	9%	7%	7%	2%
350	3%	2%	3%	4%	4%	4%	4%	1%
400	1%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 63 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 35°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 35° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	409%	389%	420%	362%	257%	379%	468%	307%
15	430%	405%	442%	405%	258%	377%	480%	325%
20	460%	430%	472%	447%	269%	407%	507%	348%
25	489%	453%	496%	484%	292%	435%	535%	369%
30	527%	484%	531%	527%	321%	468%	572%	397%
40	539%	486%	537%	544%	335%	476%	581%	395%
50	351%	308%	344%	356%	211%	303%	378%	249%
60	171%	143%	164%	174%	89%	140%	185%	110%
70	75%	56%	70%	78%	24%	54%	83%	38%
80	43%	26%	37%	44%	2%	25%	48%	15%
90	36%	19%	31%	38%	-2%	19%	41%	12%
100	35%	18%	29%	36%	-1%	17%	39%	12%
125	31%	14%	24%	32%	-2%	13%	32%	10%
150	28%	11%	22%	28%	12%	11%	28%	9%
200	22%	8%	17%	23%	18%	9%	20%	6%
250	15%	6%	11%	15%	14%	7%	13%	4%
300	9%	4%	7%	9%	8%	7%	8%	2%
350	5%	4%	5%	7%	5%	6%	6%	2%
400	1%	1%	2%	2%	1%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 64 – Variação percentual em relação ao experimento para a inclinação de 45°, modelo 3D e ponto “C”, para expoente da lei de potência $p=0,23$.

Inclinação de 45° - 3D - Ponto C								
[mm]	NBR 6123	ASCE 7-10	AS-NZS 1170.2	EUROCODE 1	AIJ	NBCC	JH	LSD
10	464%	444%	494%	416%	293%	438%	553%	336%
15	449%	426%	478%	427%	269%	401%	532%	325%
20	473%	443%	499%	463%	275%	424%	558%	341%
25	482%	447%	502%	480%	285%	433%	569%	346%
30	507%	465%	523%	510%	305%	455%	596%	363%
40	595%	537%	605%	604%	371%	530%	692%	420%
50	658%	584%	657%	670%	420%	580%	754%	467%
60	424%	368%	416%	433%	264%	366%	484%	294%
70	138%	110%	133%	142%	67%	110%	162%	82%
80	51%	32%	46%	53%	7%	32%	64%	18%
90	38%	20%	33%	40%	-1%	20%	48%	10%
100	35%	17%	29%	36%	-2%	17%	42%	9%
125	32%	13%	25%	32%	2%	13%	35%	8%
150	29%	12%	23%	30%	15%	12%	30%	8%
200	23%	9%	18%	24%	18%	9%	21%	6%
250	17%	7%	13%	17%	12%	8%	14%	4%
300	10%	5%	8%	10%	6%	7%	9%	2%
350	4%	3%	4%	6%	3%	5%	5%	1%
400	1%	1%	2%	3%	1%	2%	2%	0%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

5.3 MODELO REDUZIDO DE UM MORRO REAL

O estudo do modelo reduzido de um morro real é dividido em: morro sem mesa auxiliar e com mesa auxiliar, além dos 4 ângulos de incidência: 10°, 200°, 288° e 327°. O vento utilizado possui expoente da lei de potência $p=0,23$, correspondente a categoria III e IV da NBR 6123 e que condiz com a rugosidade encontrada no local. Para tanto, utilizou-se a tabela 22 –

Velocidade Normalizada S_2 da NBR 6123 (ABNT, 1988). As velocidades estão normalizadas na cota 345 mm. As cotas analisadas foram: 7, 12, 17, 22, 27, 32, 40, 47, 55, 62, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 145, 170, 195, 220, 245, 270, 295, 320, 345 mm.

5.3.1 Morro sem mesa auxiliar

O comportamento dos perfis de velocidade é observado nos gráficos das figuras 61 e 62, pontos “A” e “B”, respectivamente.

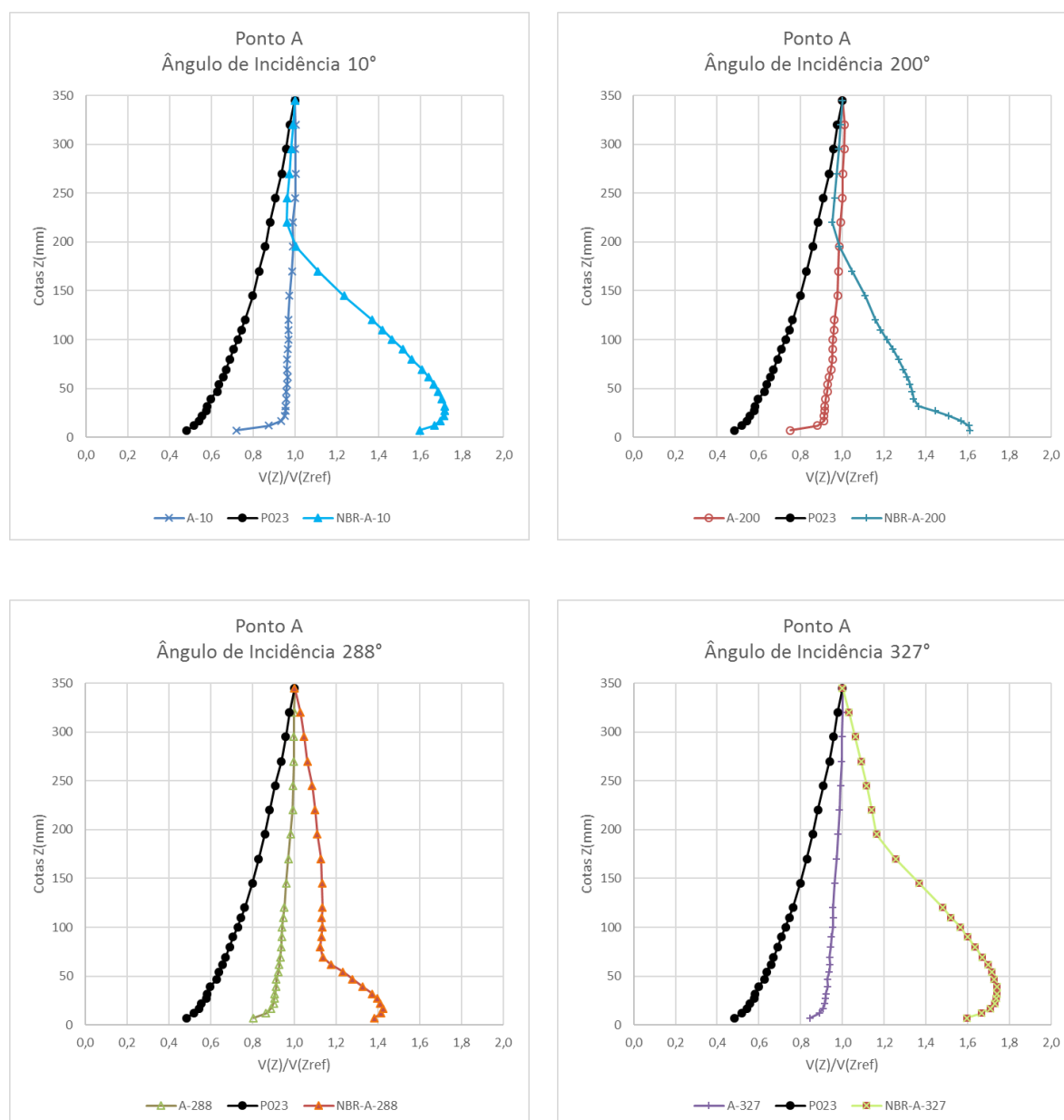


Figura 61 – Perfil de velocidades normalizadas modelo sem mesa auxiliar, para o ponto A.

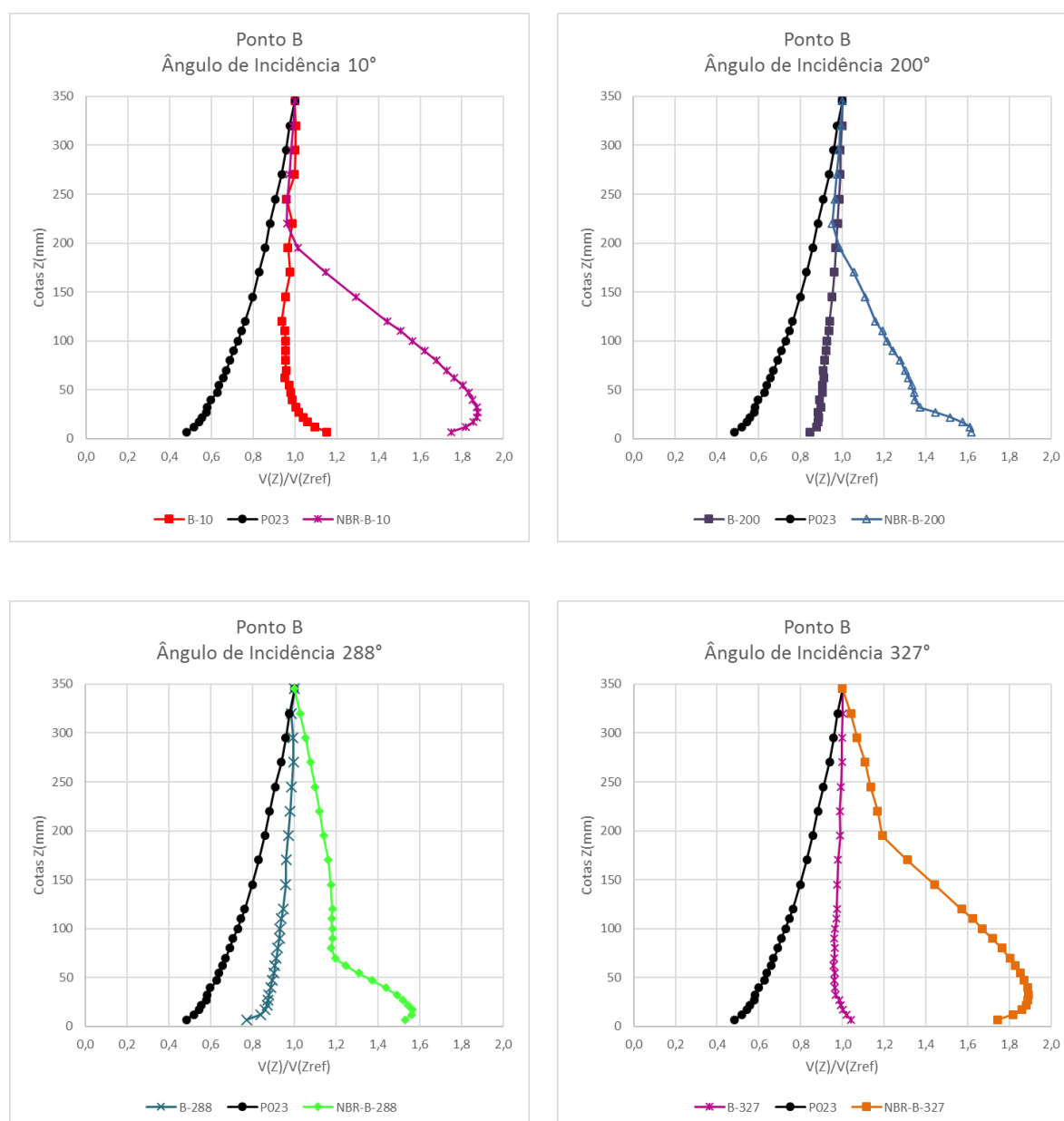


Figura 62 – Perfil de velocidades normalizadas modelo sem mesa auxiliar, para o ponto B.

5.3.2 Morro com mesa auxiliar

Os gráficos das figuras 63 e 64 abordam os resultados com a mesa auxiliar. Os resultados não apresentam o perfil de velocidades da NBR 6123, pois a Norma Brasileira não aborda os efeitos de morros adjacentes

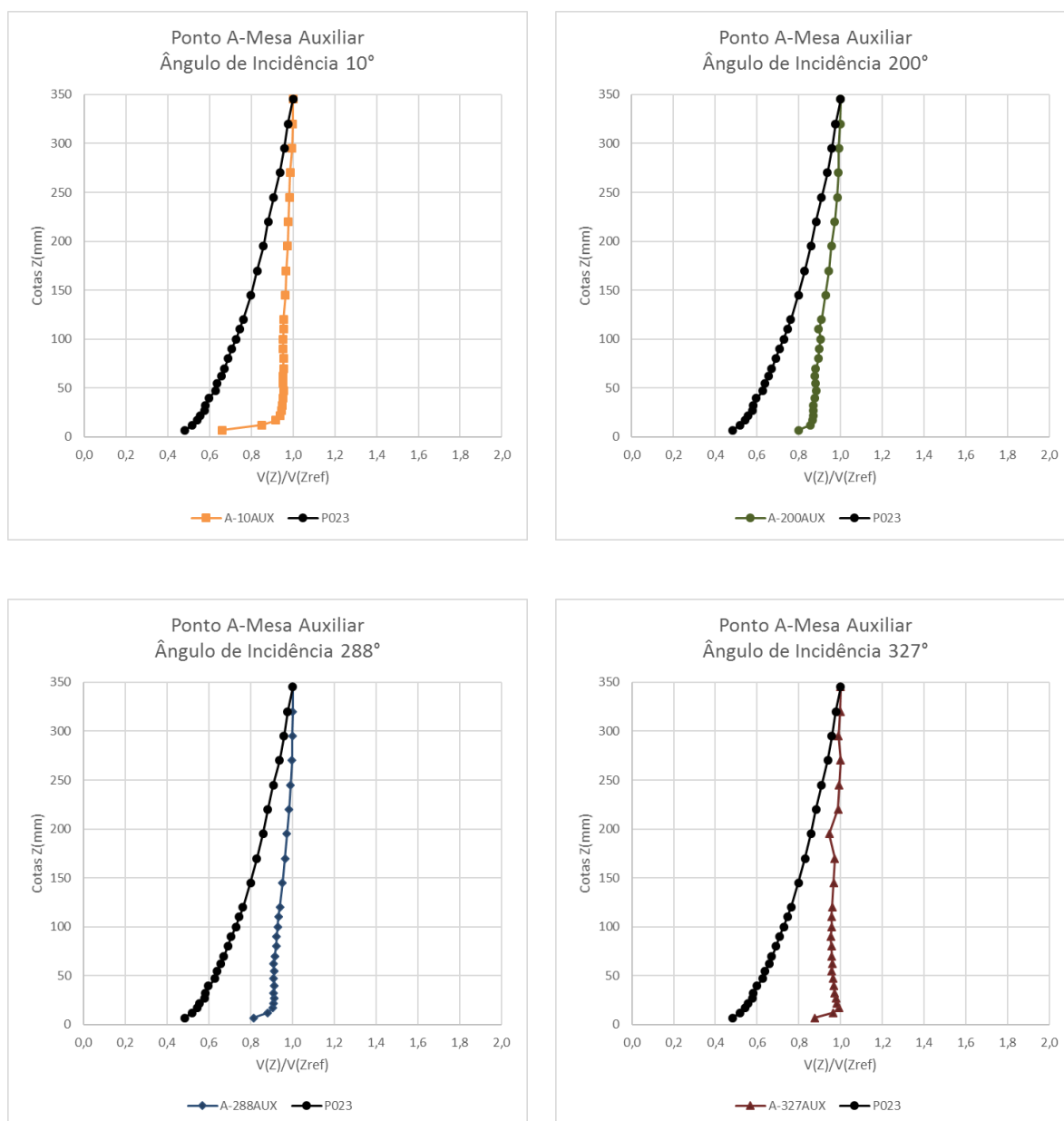


Figura 63 – Perfil de velocidades normalizadas modelo com mesa auxiliar, para o ponto A.

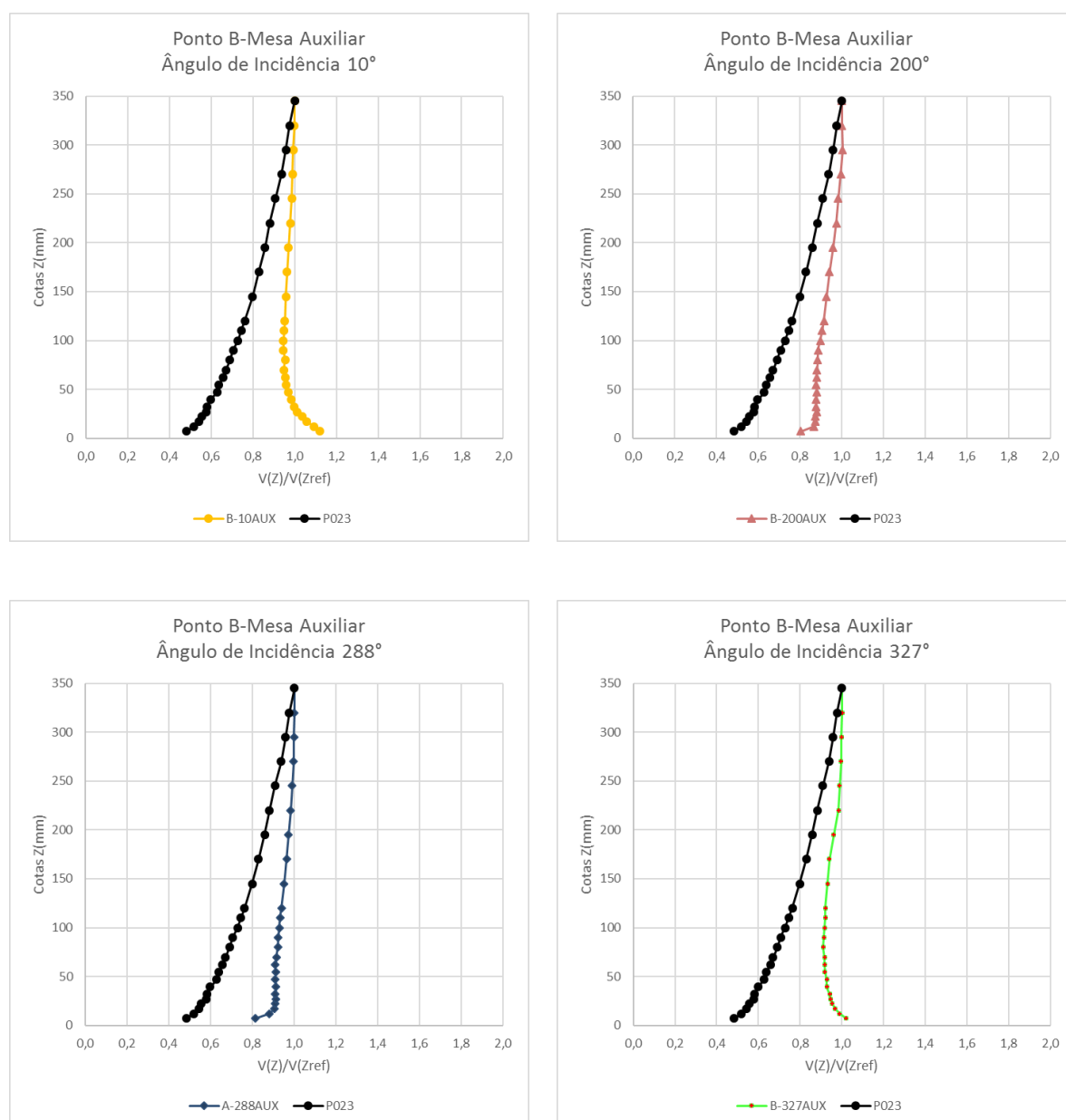


Figura 64 – Perfil de velocidades normalizadas modelo com mesa auxiliar, para o ponto B.

5.3.3 Comparação do Morro com e sem mesa auxiliar

Neste item é apresentado a comparação entre os ângulos de incidência com e sem mesa auxiliar (figuras 65 e 66). A comparação entre o perfil de velocidades para o modelo reduzido de um morro real sem e com a mesa auxiliar é importante, principalmente, para investigar a influência de morros adjacentes.

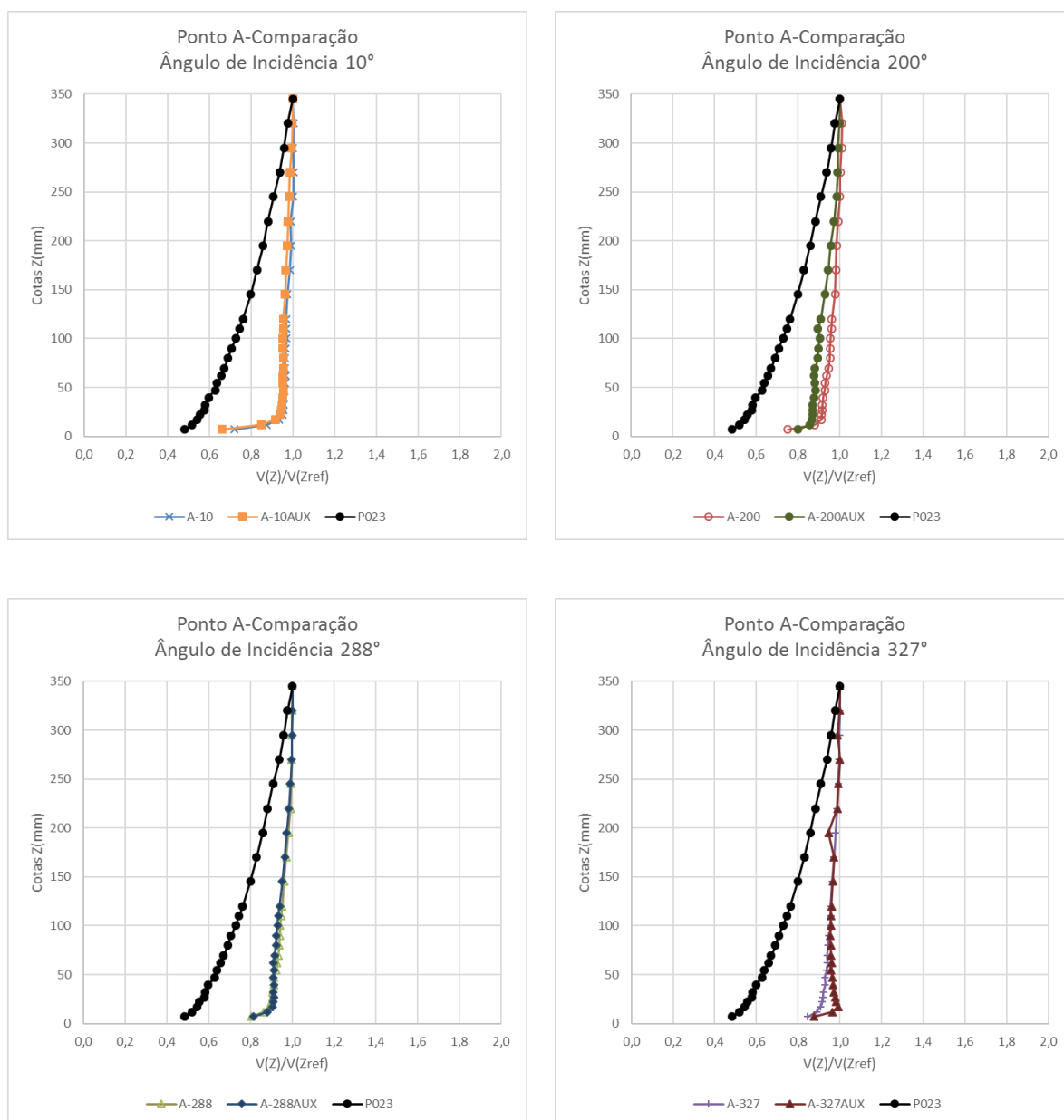


Figura 65 – Perfil de velocidades normalizadas para o ponto “A”, comparação de perfis com e sem mesa auxiliar.

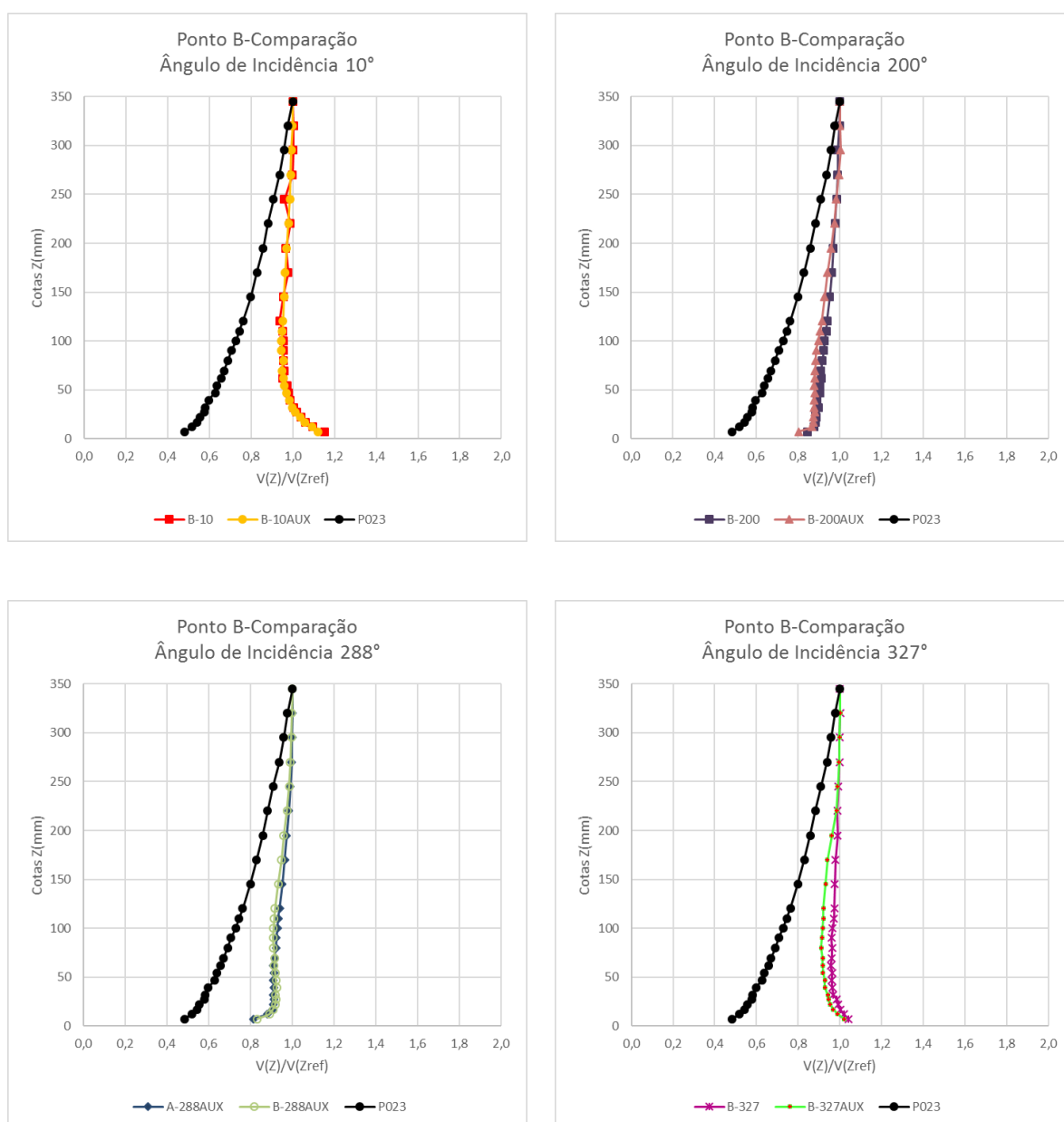


Figura 66 – Perfil de velocidades normalizadas para o ponto “B”, comparação de perfis com e sem mesa auxiliar.

As comparações realizadas entre os diferentes ângulos são importantes para analisar a influência das inclinações que cada ângulo de incidência apresenta. Assim, nos gráficos da figura 67, podemos observar o gráfico para o ponto “A” sem mesa auxiliar, para todos os ângulos de incidência, e assim sucessivamente.

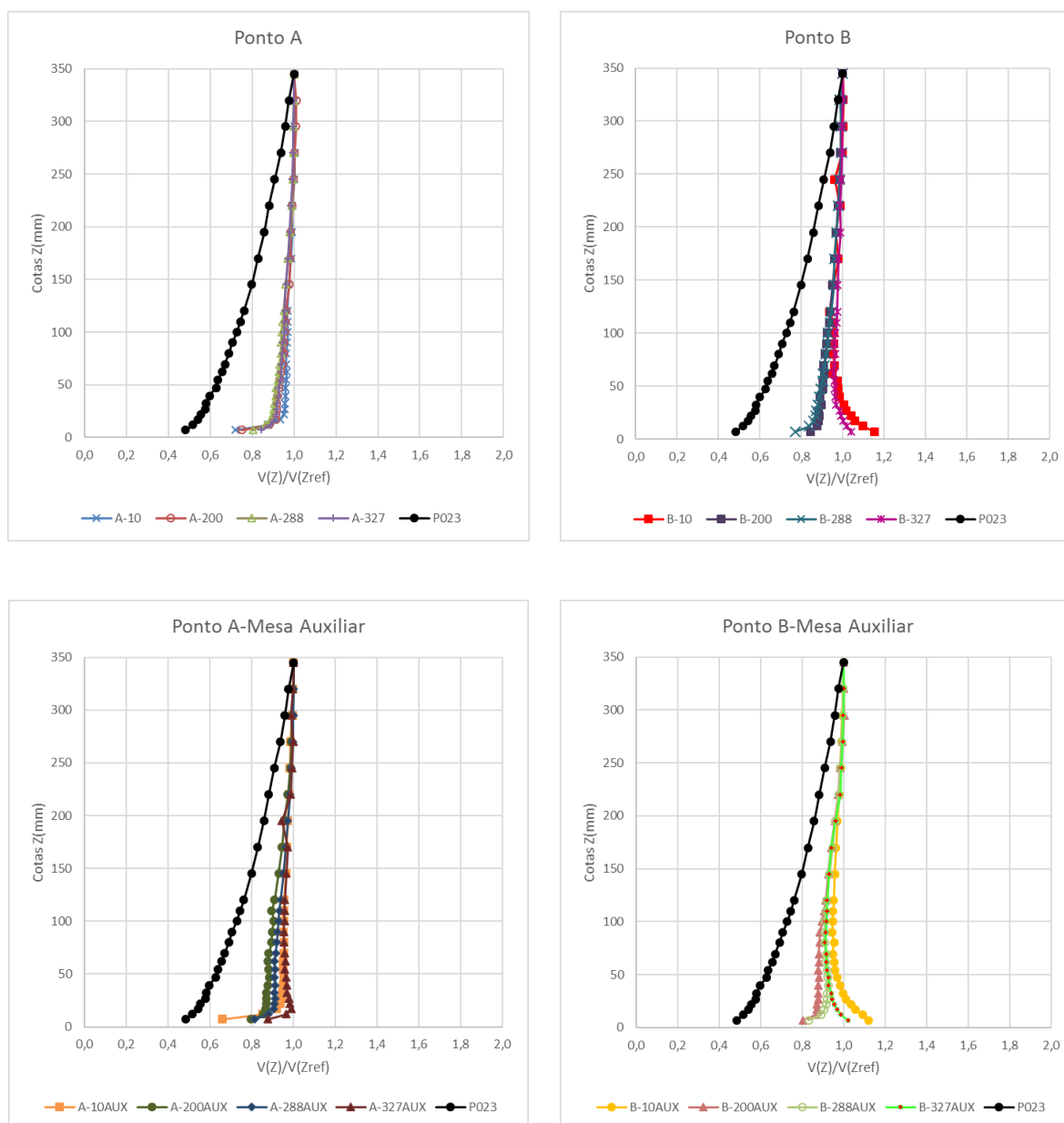


Figura 67 – Perfil de velocidades normalizadas para modelo reduzido de morro real.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisados os resultados apresentados no capítulo anterior. Para tanto as análises serão divididas em subitens para melhor entendimento. O primeiro subitem refere-se a comparação das normas para um terreno plano, tipo categoria II da NBR 6123. Após será realizada uma análise dos modelos reduzidos hipotéticos e pôr fim do modelo reduzido de um morro real.

6.1 TERRENO PLANO

Primeiramente, analisa-se os resultados para um terreno plano de categoria II (figura 42), segundo a NBR 6123, visto que as velocidades básicas de todas as normas analisadas se assemelham com essa categoria. Por conseguinte, esperasse que haja uma similaridade entre os perfis calculados por essas normas. Porém, observa-se que mesmo os perfis de velocidade apresentarem curvas semelhantes, não há uma coincidência entre todos os perfis, principalmente nos primeiros 200 mm.

A Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988), a Japonesa AIJ (AIJ, 2004) mostraram perfis coincidentes. A norma americana ASCE 7-10 (ASCE/SEI,2010) e a norma canadense NBCC (NRCC, 2010), apresentaram perfis de velocidade muito semelhantes as normas supracitadas. Por outro lado, as normas australiana/neozelandesa AS-NZS 1170.2 (AS/NZS, 2011) e o EUROCODE 1 (CEN-TC, 2010), apresentaram perfis com velocidades superiores as demais, conforme figura 61.

6.2 MODELOS REDUZIDOS HIPOTÉTICOS

Os modelos reduzidos hipotéticos são divididos em três grupos conforme os pontos que foram obtidos os perfis de velocidade: Ponto “A”, Ponto “B” e Ponto “C”, barlavento, centro e sotavento, respectivamente. Os modelos reduzidos executados tinham inclinações 13°, 20°, 35° e 45°. Para cada modelo reduzido foram reproduzidos um modelo 2D e um modelo 3D. Além disso, os modelos reduzidos foram expostos a escoamento de vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ e $p=0,23$. A análise dos resultados será dividida da mesma forma que os

resultados foram apresentados: escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ e modelos 2D, escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ e modelos 3D, escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ e modelos 2D e por fim escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ e modelos 2D.

6.2.1 Ponto “A”: barlavento

Para o escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ e modelos 2D e 3D, representado pelas figuras 43 e 44, todas as normas e modelos calculados apresentam perfis de velocidades superiores aos dados experimentais. A NBR 6123 apresentou perfis de velocidades mais conservadoras que as demais, exceto para as inclinações de 35° e 45° e cotas até 100 mm. Já a norma AIJ e o modelo analítico LSD apresentaram perfis de velocidades semelhante ao experimental. Quando se analisa a variação percentual (tabelas 17 a 20 e de 25 a 28), percebe-se que a norma AIJ e o modelo LSD apresentam variações bem menores que os demais, com percentuais inferiores a 30%. Porém para os ângulos de 35° e 45° , para todos as normas a variação é alta passando de 100% até mesmo para a AIJ e o LSD. Quando os dados experimentais são comparados com o perfil de velocidades para um terreno plano, nas mesmas condições de escoamento do vento e rugosidade. Apenas as inclinações de 35° e 45° apresentam algumas velocidades inferiores que as velocidades do terreno plano (velocidades com cotas até 100 mm).

Para o escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ e modelos 2D e 3D, representado pelas figuras 45 e 46, todas as normas e modelos calculados apresentam perfis de velocidades superiores aos dados experimentais. A NBR 6123 apresentou perfis de velocidades mais conservadoras que as demais apenas para as inclinações de 13° e 20° . Já a norma que apresentou perfis de velocidades semelhante ao experimental foi a AIJ. O modelo analítico LSD também apresentou perfis de velocidades bem semelhantes, porém apenas para as inclinações de 20° , 35° e 45° , apenas para o modelo 2D. Quando os dados experimentais são comparados com o perfil de velocidades para um terreno plano, nas mesmas condições de escoamento do vento e rugosidade, apenas as inclinações de 35° e 45° apresentam algumas velocidades inferiores que as velocidades do terreno plano (velocidades com cotas até 100 mm). Quando se analisa a variação percentual (tabelas 21 a 24 e 29 a 32) percebe-se que a norma AIJ e o modelo LSD apresentam variações bem menores que os demais. O vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ apresentou valores mais próximos aos dados experimentais, principalmente para a norma AIJ e o modelo LSD, com variações entre -10% a 10% em alguns casos. É notório

que a Norma Brasileira é uma das normas que apresenta a maior variação. As maiores variações para os modelos apresentados são maiores para as cotas até 50 mm. O modelo 45° onde as Normas Brasileira, Americana, Australiana/Neozelandesa, Canadense e o modelo analítico Jackson e Hunt apresentam variação maiores que 200% em relação ao experimento, o que demonstram o quão conservadoras essas normas calculam a velocidade incremental.

As inclinações do morro de 35° e 45° em todos os tipos de escoamento e rugosidade apresentam velocidades inferiores quando comparado com um terreno plano. Esse fenômeno também pode ser observado nos estudos de Meroney et al. (1976). As características do estudo são: maior inclinação estudada pelos autores foi 1:2, aproximadamente 26,5°, os pontos analisados foram no topo do morro, a 50% da altura do morro, no sopé do morro e a 100 cm de distância do morro, todas a barlavento. Apenas para a inclinação de 1:2 a 50% da altura do morro, é observado que o perfil de velocidades tem velocidades inferiores quando comparado a 100 cm de distância do morro, onde ainda o escoamento não sofre a influência do morro. Este fenômeno também pode ter acontecido pelos procedimentos de medição, visto que a sonda utilizada não mede tridimensionalmente os vetores da velocidade.

O estudo realizado neste trabalho demonstrou que o ponto “A”, a barlavento do morro, apresentou velocidades incrementais, porém não para todas as inclinações. Essas velocidades incrementais também são apresentadas nos estudos de Desiato et al (1998). e Ishirara, Hibi Oikawa (1999). Os pesquisadores afirmam que não é somente no cume do morro que são encontradas as velocidades incrementais, mas também em pontos adjacentes do morro a barlavento. Quando se compara os modelos 2D e 3D muitas normas não diferem a dimensionalidade do morro, ao contrário das normas Americana e Canadense, as quais calculam perfis de velocidades para modelos 2D maiores que os perfis 3D.

6.2.2 Ponto “B”: centro

Para o escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ e modelos 2D e 3D, representado pelas figuras 47 e 48, todas as normas e modelos calculados apresentam perfis de velocidades superiores aos dados experimentais, exceto o modelo LSD que apresentou velocidades menores (cotas até 100 mm, modelo 2D). Em geral, a NBR 6123 apresentou perfis de velocidades mais conservadoras que as demais. O modelo JH não reproduziu o perfil de velocidades esperado. Pela fórmula 46 observa-se que quando estamos no cume do morro o fator de forma é regido apenas pelo inverso ao quadrado da cota acima do morro, ocasionando

a distorção das primeiras cotas. O modelo analítico LSD é o que melhor reproduz os dados experimentais. Quando se analisa a variação percentual (tabelas 33 a 36 e 41 a 44) percebe-se que o modelo LSD apresenta pequenas variações, menores que 30% em geral, em comparação com os dados experimentais para um terreno plano. O modelo reduzido experimental de 13°, modelo 3D, foi o único que apresentou algumas velocidades menores que as do terreno plano, diferentemente do esperado.

Para o escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ e modelos 2D e 3D, representado pelas figuras 49 e 50, as normas e modelos calculados apresentam perfis de velocidades superiores aos dados experimentais, exceto a AIJ (cotas até 50 mm). A NBR 6123 apresentou perfis de velocidades mais conservadoras que as demais. O modelo analítico LSD é o que melhor reproduziu os perfis de velocidades obtidos no experimental. Quando os dados experimentais são comparados com o perfil de velocidades para um terreno plano, nas mesmas condições de escoamento do vento e rugosidade, todos os modelos apresentaram perfis de velocidades maiores. Quando se analisa a variação percentual (tabelas 37 a 40 e 45 a 48) percebe-se que o modelo LSD apresenta pequenas variações, menores que 20% em geral, em comparação com os dados experimentais para um terreno plano. Além do modelo LSD a norma Japonesa apresenta pequenas variações em relação aos dados experimentais, as variações para essa norma são em grande parte menores que 20%. O modelo JH apresentou variações maiores que 400% em alguns casos o que não representa a realidade.

Os perfis de velocidades obtidos no cume do morro apresentaram perfis maiores que os do ponto “A”. Isso também pode ser observado nos estudos de Meroney et al. (1976), neste estudo os pesquisadores modelaram 5 inclinações diferentes e todas apresentaram perfis de velocidades maiores no cume. Assim como, nos estudos de Counihan, Hunt e Jackson (1974), neste estudo também foi possível observar que cada inclinação reproduz um perfil de velocidades distinto. Porém não se pode afirmar que quanto maior é a inclinação, maiores serão os perfis de velocidades.

Ao comparar os modelos 2D e 3D observa-se que os perfis de velocidades para o modelo 2D tendem a ser maiores que os perfis do modelo 3D. Já para o morro com inclinação de 45° esse fenômeno já não é mais tão evidente quanto as outras inclinações. Esse fenômeno pode ser decorrente do limite de inclinação onde há a influência no perfil de velocidades. Devido a este limite, há formação de vórtices a barlavento do morro, fazendo com que o escoamento contorne o morro, sem a influência deste. Apenas as Normas ASCE e NBCC fazem essa diferenciação

no cálculo, porém apresentam perfis de velocidades de modelos 2D maiores que os 3D. Os estudos de Mattuella (2012) confirmam os resultados obtidos neste estudo, que apresenta perfil de velocidades para modelos 2D maiores que para os modelos 3D.

6.2.3 Ponto “C”: sotavento

Para o escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,11$ e modelos 2D e 3D, representado pelas figuras 51 e 52, todas as normas e modelos calculados apresentam perfis de velocidades superiores aos dados experimentais. Porém, apenas a norma AIJ tende a reproduzir o comportamento do escoamento a sotavento. As demais normas e modelos tendem a formar um perfil de velocidades com perfis de velocidades muito parecido com os perfis encontrados a barlavento. As variações percentuais (tabelas 49 a 52 e 57 a 60) das normas em relação aos dados experimentais apresentou variações de até 1000% nas primeiras cotas o que demonstra a ineficiência das normas em representar os dados experimentais. Mesmo a norma AIJ apresentar um perfil que tende a reproduzir o fenômeno as variações podem chegar a 400%

Para o escoamento do vento com expoente da lei de potência $p=0,23$ e modelos 2D e 3D, representado pelas figuras 53 e 54, todas as normas e modelos calculados apresentam perfis de velocidades superiores aos dados experimentais. Porém, apenas a norma AIJ tende a reproduzir o comportamento do escoamento a sotavento. As demais normas e modelos tendem a formar um perfil de velocidades com perfis de velocidades muito parecido com os perfis encontrados a barlavento. As variações percentuais das normas em relação aos dados experimentais para todos as normas e modelos as variações nas primeiras cotas podem chegar até 500%, para as inclinações de 13°, 20° e 35°. Para o ângulo de 45° essas variações podem chegar até 1000%. A norma Japonesa – AIJ, mesmo sendo que melhor reproduz a esteira a sotavento, ainda assim apresenta grandes variações percentuais.

A formação da esteira a sotavento do morro, assim como apresentada por este estudo, este efeito também é observado nos estudos de Arya, Capuano e Fagen (1987), Mason e Sykes (1979) e Cao e Tamura (2006). Ngo e Letchford (2008) em um estudo comparativo das principais normas internacionais, cita que a norma Japonesa – AIJ é a única que prevê a formação da esteira a sotavento, bem como é observado neste estudo.

Ao se comparar modelos 2D e 3D (figuras 57 e 60), nas primeiras cotas até 100 m, é possível perceber que o perfil de velocidades do modelo 3D é maior. Já para cotas acima de 100 m, aproximadamente, ocorre a inversão, tornando o perfil de velocidades do modelo 2D maior,

diferentemente do que é observado para os pontos “A” e “B”. Assim como os demais pontos analisados as normas Americana e Canadense fazem a diferenciação de modelos 2D e 3D, porém para pontos a sotavento, essas normas não reproduzem a esteira.

6.3 MODELO REDUZIDO DE UM MORRO REAL

O estudo de caso de um morro real é analisado para diferentes ângulos de incidência, como segue: 10° , 200° , 288° e 327° . Pelo corte apresentado nas figuras 36 a 39 é possível observar que cada ângulo de incidência apresenta inclinações diferentes, conseqüentemente perfis de velocidades diferentes. Nos itens a seguir serão analisados o morro sem mesa auxiliar e com mesa auxiliar. Como a Norma Brasileira não prevê a influência de morros adjacentes, o cálculo só foi realizado para o morro sem mesa auxiliar. Além disso, essa norma também não prevê diferentes inclinações em um morro, assim ao aproximar grosseiramente a inclinação do morro podemos distorcer o perfil de velocidades. Em consequência disso, neste estudo de caso aplicou-se um método que consiste na obtenção de fatores topográficos parciais, resultando em um perfil de velocidades maior. Assim, observa-se que o perfil de velocidades por este método adaptado é superior ao obtido nos ensaios experimentais para os dois pontos em análise.

6.3.1 Morro sem mesa auxiliar

As figuras 61 e 62 (ponto “A” e ponto “B”, respectivamente) apresentam os perfis de velocidades, para o morro sem mesa auxiliar. Os resultados experimentais, para todos os ângulos de incidência, apontam que os perfis de velocidades são maiores quando comparado com o perfil de velocidades para um terreno plano. Para os ângulos de incidência 10° e 327° observa-se que para as cotas iniciais, aproximadamente 50 mm, o ponto “B” apresenta velocidades maiores que o ponto “A”. Já para os ângulos de 200° e 288° não há significativa mudança nos perfis de velocidades, isso se deve ao fato de que os pontos “A” e “B” para os ângulos 200° e 288° estarem muito próximos.

6.3.2 Morro com mesa auxiliar

As figuras 63 e 64 (ponto “A” e ponto “B”, respectivamente) apresentam os perfis de velocidades, para o morro com mesa auxiliar, para os ângulos de incidência de 10° , 200° , 288° e 327° . Os resultados experimentais, para todos os ângulos de incidência, apontam que os perfis de velocidades são maiores quando comparado com o perfil de velocidades para um terreno

plano. Para os ângulos de incidência de 10° e 327° nas primeiras cotas velocidades maiores para o ponto “B” em relação ao ponto “A”.

6.3.3 Comparações

A figura 65 apresenta a comparação dos ângulos com e sem mesa auxiliar, para o ponto “A”, nessa figura pode-se observar que para os ângulos de incidência de 10° e 288° não apresentaram uma significativa diferença entre os perfis. Já para os ângulos de incidência de 200° sem mesa auxiliar e 327° com mesa auxiliar os perfis se apresentaram maiores que seus respectivos. A mesma comparação foi realizada para o ponto “B”, para este caso os ângulos de incidência de 10° e 288° não apresentaram uma significativa diferença entre os perfis. Para os ângulos de 200° e 327° ambos sem mesa auxiliar apresentaram perfis de velocidades maiores que seus respectivos ângulos com mesa auxiliar.

Na figura 67 é realizada uma comparação dos 4 ângulos de incidência. Para o ponto “A” sem mesa auxiliar os diferentes ângulos de incidência não influenciaram significativamente no perfil de velocidades. Já para o ponto “A” com mesa auxiliar, “B” sem mesa auxiliar e “B” com mesa auxiliar os ângulos de incidência 10° e 327° apresentaram perfis de velocidades maiores que os demais.

A função da mesa auxiliar, em um ensaio de modelo reduzido de um morro real, é aproximar a topografia ainda mais da realidade existente e, conseqüentemente, reproduzir perfis de velocidade mais fiéis a realidade. Contudo, ao estender a topografia a barlavento do morro a ser analisado, os perfis de velocidade podem sofrer alterações, gerando um aumento de velocidades ou diminuição. Assim, como não há certeza dos perfis de velocidades que são gerados em terrenos muito complexos, a melhor forma de obtê-los é em ensaios experimentais em túnel de vento. Os pesquisadores Derickson e Peterka (2004) afirmam que a implementação de um modelo analítico geral é praticamente impossível, visto que cada terreno possui uma topografia distinta das demais, sendo necessário o estudo particular de cada caso. Sendo confirmada pelos resultados obtidos quando se estende a topografia a barlavento, onde não há certeza da influência desta no morro em análise.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, as normas e modelos analíticos tendem a superestimar as velocidades incrementais, gerando perfis de velocidades muito maiores que os experimentais. Nos pontos “A” e “B”, em geral, os perfis de velocidades experimentais com a presença dos morros apresentaram perfis de velocidades quando comparados com terreno plano. Já para o ponto “C”, devido a formação da esteira a sotavento do morro, os perfis de velocidades para cotas iniciais, apresentam valores menores quando compara com o terreno plano.

A Norma Brasileira em todos os modelos estudados apresentou valores muito conservadores, normalmente, é a que apresenta o maior perfil de velocidades. A mesma norma quando é aplicada no ponto a sotavento não reproduz o efeito da esteira. Além disso, essa não diferencia os modelos 2D de 3D, diferentemente do que é obtido nos modelos experimentais. Quanto a aplicação da NBR em estudo de caso, essa é bastante simplificada e não reproduz a realidade. Enquanto algumas normas já consideram o efeito de proteção de morros ou estruturas adjacentes, modelagens 2D ou 3D, a norma brasileira apenas se restringe na forma do morro e de maneira bem simplificada utilizando uma inclinação média.

O modelo reduzido de um morro real, apresentou em todos os seus ângulos de incidência um incremento de velocidades, quando comparado com o perfil de velocidades para terreno plano. De um modo geral, o ponto “B”, que representa a extremidade superior do morro, tende a apresentar velocidades maiores nas cotas mais próximas a superfície em comparação com o ponto “A”. Porém para os ângulos de incidência 200° e 288° não houve alterações entre esses pontos, devido ao fato de estarem muito próximos.

Quando comparados os ângulos de incidência dos morros sem mesa auxiliar com o, respectivo, ângulo com mesa auxiliar, os perfis de velocidades apresentaram pequenas alterações. Isso se deve ao fato de que, com a mesa auxiliar a barlavento podem estar localizados que protegem o morro em análise ou, ao invés de proteção, prejudicam o perfil de velocidades do morro analisado.

A diferenciação entre modelos 2D e 3D apresentadas pelos dados obtidos dos modelos experimentais, não é contemplada por maior parte das normas e modelos estudados. Apenas, as

normas Americana – ASCE e Canadense – NBCC apresentam cálculos para distinguir um modelo 2D de um 3D. Mesmo assim, nos pontos analisados essas normas apresentaram modelos 2D com perfis maiores que os 3D, o que vale apenas para pontos a barlavento e no cume.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, devido a limitação deste trabalho em analisar somente as inclinações de 13°, 20°, 35° e 45°, seria interessante que se estudasse inclinações inferiores a 13°. Visto que, nos estudos de Mattuella (2012), foram estudadas as inclinações de 25°, 32°, 52° e 68°.

Além disso, é necessário ampliar os pontos de medição a barlavento e a sotavento, neste estudo foram analisados apenas um ponto a barlavento e um ponto a sotavento, ambos com altura de “ $d/2$ ”. Outro estudo interessante é realizar experimentos de morros com mais de uma inclinação, pois neste estudo e de Mattuella, foram executados apenas inclinações constantes. Por fim, da mesma forma que o estudo de caso, sugiro um estudo com a implementação de topografia a barlavento do morro em análise, para se verifica esta influência.

REFERÊNCIAS

- ABDI, D. S.; BITSUAMLAK, G. T. Wind flow simulations on idealized and real complex terrain using various turbulence models. **Advanced in Engineering Software**, v. 75, p. 30-41, 2014.
- ABNT. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro 1988.
- AIJ. **Recommendations for Loads on Buildings**. Tokyo: ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN 2004.
- ARYA, S.; CAPUANO, M.; FAGEN, L. Some fluid modeling studies of flow and dispersion over two-dimensional low hills. **Atmospheric Environment**, v. 21, n. 4, p. 753-764, 1987.
- AS/NZS. **Australian /New Zealand 1170.2: Structural Design Actions - Part 2: Wind Actions**. Sidney: SAI Global Limited 2011.
- ASCE. **ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures**. Virginia: ASCE 2010.
- AYOTTE, K. W.; DAVY, R. J.; COPPIN, P. A. A simple temporal and spatial analysis of flow in complex terrain in the context of wind energy modelling. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 98, n. 2, p. 275-295, 2001.
- AYOTTE, K. W.; HUGHES, D. E. Observations of boundary-layer wind-tunnel flow over isolated ridges of varying steepness and roughness. **Boundary-layer meteorology**, v. 112, n. 3, p. 525-556, 2004.
- BARLOW, J. B.; RAE JR., W. H; POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. 3. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1999. ISBN 0-471-55774-9.
- BLESSMANN, J., 1982, The Boundary Layer TV-2 Wind Tunnel of the UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 10. p. 231-248.
- _____. **Aerodinâmica das construções**. Ed. da Universidade, UFRGS, 2011. 264 f. ISBN 8570250398.
- _____. **O Vento na Engenharia Estrutural**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013. ISBN 978-85-386-0204-0.
- BOWEN, A. The prediction of mean wind speed above simple 2D hill shapes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 15, n. 1, p. 259-270, 1983.
- BOWEN, A.; LINDLEY, D. A wind-tunnel investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 12, n. 3, p. 259-271, 1977.

BRADLEY, E. F. 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.; HUNT, J.; RICHARDS, K. Air flow over a two-dimensional hill: Studies of velocity speed-up, roughness effects and turbulence. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 107, n. 451, p. 91-110, 1981.

BÚRIGO, V. C. **Análise da modelagem numérica do vento para avaliação do potencial eólico em um terreno complexo empregando CFD**. 2014. 80 f. (Dissertação (Mestre em Engenharia)). Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CAO, S.; TAMURA, T. Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 94, n. 1, p. 1-19, 2006.

CARPENTER, P.; LOCKE, N. Investigation of wind speeds over multiple two-dimensional hills. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 83, n. 1, p. 109-120, 1999.

CEN. **EUROCODE 1: Actions on structures - Part 1-4: General Actions - Wind Actions**. Brussels 2010.

COOK, N. On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel. **Atmospheric Environment**, v. 7, n. 7, p. 691-705, 1973.

_____. Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 3, n. 2, p. 157-176, 1978.

_____. The atmospheric boundary layer. In: *The Designer's guide to wind loading of building structures - Part 1*. Butterworths, Great Britain. 1985.

CORBY, G. A.. The airflow over mountains - A review of the state of current knowledge. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 80, n. 346, p. 491-521, 1954.

CORBY, G. A.; WALLINGTON, C. E. Airflow over mountains: The lee-wave amplitude. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 82, n. 353, p. 266-274, 1956.

COUNIHAN, J.; HUNT, J.; JACKSON, P. Wakes behind two-dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 64, n. 03, p. 529-564, 1974.

DERICKSON, R. G.; PETERKA, J. A. Development of a powerful hybrid tool for evaluating wind power in complex terrain: atmospheric numerical models and wind tunnels. Proceedings of the 23rd ASME Wind Energy Symposium, 2004. p.15.

DESIATO, F.; FINARDI, S.; BRUSASCA, G.; MORSELLI, M.G. TRANSALP 1989 experimental campaign-I. Simulation of 3D flow with diagnostic wind field models. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 7, p. 1141-1156, 1998.

DURAÑONA, V.; STERLING, M.; BAKER, C. J. An analysis of extreme non-synoptic winds. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 95, n. 9, p. 1007-1027, 2007.

FERREIRA, A. D.; LOPES, A. M. G.; VIEGAS, D. X.; SOUSA, A. C. M. Experimental and Numerical simulation of flow around two-dimensional hills. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 54, p. 173-181, 1995.

HERTIG, J.-A. Wind tunnel measurement of velocity profiles in complex terrain. Case of alpine regions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 28, n. 1, p. 105-115, 1988.

HOLMES, J. **Emerging Issues in Wind Engineering - Part 2**. Internacional Conference on Wind Engineering. Lubbock, Texas: AAWE 2003.

HOLMES, J. D. **Wind loading of structures**. London: Taylor & Francis Group, 2001. ISBN 0-419-24610-2001.

HOLTON, J. R. The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain. **Tellus** **19.2**, p. 199-205. 1967

ISHIHARA, 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, n. 1, p. 95-107, 1999.

JACKSON, P.; HUNT, J. Turbulent wind flow over a low hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 101, n. 430, p. 929-955, 1975.

JENSEN, N. Escarpment induced flow perturbations, a comparison of measurements and theory. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 15, n. 1, p. 243-251, 1983.

KAREEM, A.; TAMURA, Y. **Advanced structural wind engineering**. Springer, 2013. ISBN 4431543368.

KIM, H. G.; LEE, C. M.; Lim, H. C.; KYONG, N. H. An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 66, n. 1, p. 17-33, 1997.

KOZMAR, H. Wind-tunnel simulations of the suburban ABL and comparison with international standards. **Wind & Structures**, v. 14, n. 1, p. 15-34, 2011.

KUSTAS, W. P.; BRUTSAERT, W. Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 34, n. 1-2, p. 35-54, 1986.

KWON, D. K.; KAREEM, A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. **Engineering Structures**, v. 51, p. 23-35, 2013.

LECLERCQ, D. J.; JACOB, M. C.; LOUISOT, A. TALOTTE, C. Forward-backward facing step pair: aerodynamic flow, wall pressure and acoustic characterisation. **AIAA paper**, v. 2249, 2001.

LEMELIN, D.; SURRY, D.; DAVENPORT, A. Simple approximations for wind speed-up over hills. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 28, n. 1, p. 117-127, 1988.

LIN, W. E.; SAVORY, E. Large-scale quasi-steady modelling of a downburst outflow using a slot jet. **Wind and Structures**, v. 9, n. 6, p. 419-440, 2006.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. **Turbulência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas-ABCM**, v. 4, p. 137-163.1, 2004.

MASON, P.; KING, J. Atmospheric flow over a succession of nearly two-dimensional ridges and valleys. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 110, n. 466, p. 821-845, 1984.

MASON, P.; SYKES, R. Flow over an isolated hill of moderate slope. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 105, n. 444, p. 383-395, 1979.

MATTUELLA, J. M. L. **Avaliação em túnel de vento do comportamento da camada limite atmosférica em terrenos complexos**. 2012. 286 f. (Doutor em Engenharia). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MCAULIFFE, B. R.; LAROSE, G. L. Reynolds-number and surface-modeling sensitivities for experimental simulation of flow over complex topography. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104, p. 603-613, 2012.

MERONEY, R. N. Sites for wind power installations. *Wind Workshop* (2), Mitre Corp, 1975. p.344-354.

MERONEY, R. SANDBORN, V. A.; BOUWMEESTER, R.; RIDER, M. Wind tunnel simulation of the influence of two dimensional ridges on wind speed and turbulence. *International Symposium on Wind Energy Systems*, 1976. p.6.

MERONEY, R. N. Wind-tunnel simulation of the flow over hills and complex terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 5, n. 3, p. 297-321, 1980.

MILLER, C.; DAVENPORT, A. Guidelines for the calculation of wind speed-ups in complex terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 74, p. 189-197, 1998.

MILLER, C. A. **Turbulent boundary layers above complex terrain**. 1996. 255 f. (Doctor in Philosophy). Faculty of Graduate Studies, University of Western Ontario, London, Ontario.

NEAL, D.; STEVENSON, D.; LINDLEY, D. A wind tunnel boundary-layer simulation of wind flow over complex terrain: Effect of terrain and model construction. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 21, n. 3, p. 271-293, 1981.

NGO, T.; LETCHFORD, C. A comparison of topographic effects on gust wind speed. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 96, n. 12, p. 2273-2293, 2008.

NØRSTRUD, H. Wind flow over low arbitrary hills. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 23, n. 1, p. 115-124, 1982.

NRCC. **National Building Code of Canada** Ottawa: NRC Publications 2010.

RASOULI, A.; HANGAN, H.; SIDDIQUI, K. PIV measurements for a complex topographic terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 97, n. 5, p. 242-254, 2009.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Energia Minas e Comunicação. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. Rio Grande do Sul, 2002.

SALMON, J.; TEUNISSEN, H. W.; MICKLE, R. E.; TAYLOR, P.A. The kettles hill project: field observations, wind-tunnel simulations and numerical model predictions for flow over a low hill. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 43, n. 4, p. 309-343, 1988.

SCORER, R. S. Theory of airflow over mountains: II-The flow over a ridge. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 79, n. 339, p. 70-83, 1953.

_____. Theory of airflow over mountains: IV-separation of flow from the surface. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 81, n. 349, p. 340-350, 1955.

_____. Airflow over an isolated hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 82, n. 351, p. 75-81, 1956.

SHERRY, M.; JACONO, D. L.; 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, n. 12, p. 888-894, 2010.

SIMIU, E. **Design of buildings for wind: A guide for ASCE 7-10 Standard users and designers of special structures**. John Wiley & Sons, 2011. ISBN 1118077377.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind Effects on Structures: Fundamentals and Application to Design**: New York: John Wiley & Sons 1996.

STATHOPOULOS, T.; ZISIS, I.; WANG, K. Terrain Classification and Exposure Factor in the 2005 National Building Code of Canada. 5th Workshop on Regional Harmonization of Wind Loading and Wind Environmental Specifications in Asia-Pacific Economies–APEC ww, 2009. p.12-14.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Springer Science & Business Media, 1988. ISBN 9027727686.

TAKAHASHI, T.; KATO, S.; MURAKAMI, S.; OOKA, R.; YASSIN, M. F.; KONO, R. Wind tunnel tests of effects of atmospheric stability on turbulent flow over a three-dimensional hill. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 93, n. 2, p. 155-169, 2005.

TAKAHASHI, T.; OTSU, T.; YASSIN, M. F.; KATO, S.; MURAKAMI, S. Turbulence characteristics of wind over a hill with a rough surface. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 90, n. 12, p. 1697-1706, 2002.

TAYLOR, P. A.; TEUNISSEN, H. The Askervein Hill project: overview and background data. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 39, n. 1-2, p. 15-39, 1987.

TAYLOR, P. A.; MASON, P. J.; BRADLEY, E. F. Boundary-layer flow over low hills. **Boundary-layer meteorology**, v. 39, n. 1-2, p. 107-132, 1987.

TEUNISSEN, H. Wind-tunnel and full-scale comparisons of mean wind flow over an isolated low hill. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 15, n. 1, p. 271-286, 1983.

WOOD, N. Wind flow over complex terrain: a historical perspective and the prospect for large-eddy modelling. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 96, n. 1-2, p. 11-32, 2000.

WOOD, N.; MASON, P. J. The pressure force induced by neutral turbulent flow over hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 119, n. 451, p. 1233-1267, 1993.

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 Meteorology**, v. 59, p. 177-186, 1992.

XU, D.; TAYLOR, P. A.; AYOTTE, K. W. Development of a non-linear mixed spectral finite-difference model for turbulent boundary layer flow over topography. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 70, n. 4, p. 341-367, 1994.