

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

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO
DAS VELOCIDADES INCREMENTAIS SOBRE MORROS E
TALUDES**

Josiane Anderle Scotton

Porto Alegre
2020

JOSIANE ANDERLE SCOTTON

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO
DAS VELOCIDADES INCREMENTAIS SOBRE MORROS E
TALUDES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2020

JOSIANE ANDERLE SCOTTON

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO
DAS VELOCIDADES INCREMENTAIS SOBRE MORROS E
TALUDES**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR 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, 03 de dezembro de 2020

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

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Techn. Universität Innsbruck, Áustria
coorientador

Prof. Nilo César Consoli
Coordenador do PPGE/UFGRS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel (UFGRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

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

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

Mário Gustavo Klaus Oliveira (Vento S Consultoria em Engenharia do Vento)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho aos 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 memorian*), minha irmã Cristiane 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 ao Prof. Marcelo Maia Rocha, coorientador deste trabalho, pelos ensinamentos.

Agradeço a equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC UFRGS, em especial aos técnicos Roges De Mari Leopoldo e João Pedro Miranda Anzolch sempre muito solícitos.

Agradeço ao Eng. Mário Gustavo Klaus Oliveira pelos ensinamentos e oportunidade de aplicar o conhecimento gerado pelas minhas dissertação e tese.

Agradeço ao CAPES/CNPq pela bolsa de estudos.

“Os sonhos precisam de persistência e coragem para serem realizados. Nós os regamos com nossos erros, fragilidades e dificuldades. Quando lutamos por eles, nem sempre as pessoas que nos rodeiam nos apoiam e nos compreendem. Às vezes somos obrigados a tomar atitudes solitárias, tendo como companheiros apenas nossos próprios sonhos”.

Augusto Cury

RESUMO

SCOTTON, J. A. Determinação Experimental em Túnel de Vento das Velocidades Incrementais sobre Morros e Taludes. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A camada limite atmosférica (CLA) é a região da troposfera que é diretamente influenciada pela superfície terrestre. Nesta região o perfil de velocidades do vento é variável e as velocidades são menores quanto mais próximas estiverem da superfície terrestre devido à influência da rugosidade superficial. Entretanto quando o escoamento do vento incide em terrenos não planos, ou seja, com morros e taludes o perfil de velocidades é influenciado por esta topografia. No cume de morros ou taludes, ocorre o fenômeno do *speed-up*, que é um aumento das velocidades nesta região. Esta pesquisa tem como foco a investigação do perfil de velocidades em um escoamento turbulento, para topografias isoladas. 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. Os modelos experimentais dos morros têm seção transversal triangular e sinusoidal, com ângulos de 20° e 45°. Quanto à dimensionalidade, podem ser bidimensionais ou tridimensionais. Além do estudo de morros, nesta tese também será desenvolvido o estudo em taludes, neste caso, a seção transversal é triangular bidimensional. Os ângulos analisados são de 20° e 45° e apresentam patamares intermediários a barlavento. Os modelos foram ensaiados para a categoria de terreno I, conforme a Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988): superfícies lisas de grandes dimensões, no túnel de vento Prof° Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 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). Além disso, uma importante contribuição desta tese é uma proposição para o fator topográfico da NBR 6123. Os resultados para os morros e taludes estudados apresentaram perfis de velocidades a barlavento, cume e sotavento compatíveis com a literatura estudada. Em relação as diferentes características estudadas, no geral, observaram-se diferenças significativas entre as variáveis. Para os ângulos estudados observou-se que o ângulo de 45° apresentou maiores incrementos de velocidade no cume. Em relação à seção transversal, os modelos sinusoidais apresentaram maiores incrementos de velocidades no cume. A extensão do cume de 1H e 3H apresentou diferenças significativas tanto para modelos 2D como 3D. Os taludes 2D com patamares intermediários a barlavento apresentou significativa diminuição das velocidades no cume do morro e é influenciado pela quantidades e comprimento destes patamares. Quando comparados os resultados experimentais às normas, observa-se que há uma tendência dos modelos em superestimar os valores dos perfis de velocidades. Além disso, cada modelo possui características próprias e adequadas ao país de origem. Dentre as normas estudadas, a norma brasileira NBR 6123 apresentou os maiores incrementos de velocidades em comparação com as demais normas. A proposição da nova formulação para o fator topográfico apresentou valores bem precisos com os dados experimentais, para os modelos 2D Morros, 3D Morros e 2D Taludes.

Palavras-chave: *morro, efeito topográfico; perfil de velocidades; incremento de velocidade; NBR-6123, normas.*

ABSTRACT

SCOTTON, J. A. Wind Tunnel Experimental Determination of the Speed-up Factor Over Hills and Scarps. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The atmospheric boundary layer (ABL) is a region of the troposphere that is directly influenced by Earth's surface. In this region the wind speed profile is variable and the speeds are lower the closer they are to the Earth's surface due to the influence roughness surface. However, when the wind flow occurs in non-flat terrain, that is, with hills and slopes the wind speed profile is influenced by the topography. In the top of the hills and ridges occur the speed-up phenomenon, which is an increase in speeds closest to the surface. This research focuses on the investigation of the structure of the wind flow, analyzing in detail the speed profile in a turbulent flow, for the isolated topographies. For this, two methods were used to obtain the speed profile: experimental tests in the wind tunnel and application of wind load codes and analytical models. The experimental models of the hills have a triangular and sinusoidal cross section, with angles of 20° and 45°. As for dimensionality, they can two-dimensional or three-dimensional. In addition to the hill study, in this thesis the ridge study will also be developed, in this case, the cross section is two-dimensional triangular. The angles analyzed are 20° and 45°, and have a upwind levels. The models were tested for the terrain category, according to Brazilian Standard NBR 6123 (ABNT, 1988): I – large smooth surfaces, in the wind tunnel Prof^o Joaquim Blessmann at Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). The analytical models studied were: Jackson e Hunt (1975), Lemelin, Surry e Davenport (1988), and the standards studied were: NBR 6123 (ABNT, 1988), Eurocode 1 (CEN, 2010), AIJ (AIJ, 2004), NBCC (NRCC, 2010), AS/NZS (AS/NZS, 2011), ASCE (ASCE, 2010). Furthermore, one important contribution thesis is a proposition for the topographic factor of NBR 6123. The results for the hills and ridges studies presented wind speed profile in the upwind, top and downwind compatible with the studied literature. In relation to the different characteristics studied, in general, were observed significant differences between the variables. For the studied angles it was observed that the 45 ° angle showed greater increments of speed at the summit. In relation to the cross section, the sinusoidal models showed higher increments of speed at the summit. The ridge extension of 1H and 3H showed significant differences for both 2D and 3D models. 2D slopes with intermediate windward levels showed a significant decrease in speed at the top of the hill and is influenced by the number and length of these levels. When comparing the experimental results to the standards, it is observed that there is a tendency of the models to overestimate the values of the wind speed profiles. In addition, each model has its own characteristics and appropriate to the country of origin. Among the studied standards, the NBR 6123 present the largest speed increments compared to the other standards. The proposal of the new formulation for the topographic factor presents very precise values, given by experiments, for the 2D Morros, 3D Morros and 2D Slopes models.

Key-words: *hill; topography effects; speed profile; speed-up; NBR-6123, standards.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	30
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	33
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	35
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	36
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DO VENTO	37
2.1.1 Camada limite atmosférica	37
2.1.2 Vento	39
2.1.3 Classificação do vento	40
2.1.4 Perfil de velocidades médias	41
2.1.5 Efeito do bloqueio em túnel de vento	43
2.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS	44
2.2.1 escoamento em terrenos planos	44
2.2.2 escoamento em morros e taludes	45
2.2.3 Geometria de morros e de taludes	46
2.2.4 Dimensionalidade dos morros e taludes	46
2.2.4.1 Estudos de modelos 2D	47
2.2.4.2 Estudos de modelos 3D	65
2.2.5 Estudos de parâmetros fundamentais	72
3 MODELOS ANALÍTICOS PARA EFEITO TOPOGRÁFICO	75
3.1 MODELOS ANALÍTICOS E NORMAS TÉCNICAS: INTRODUÇÃO	75
3.2 NORMA BRASILEIRA: NBR-6123:1988 – FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES	77
3.2.1 Velocidade básica e característica do vento – NBR 6123:1988	77
3.2.2 Fator topográfico S_1 – NBR 6123:1988	79
3.2.3 Fator de rugosidade S_2 – NBR 6123:1988	80
3.2.3.1 Rugosidade do terreno	81
3.2.3.2 Dimensões da edificação	81
3.2.3.3 Altura sobre o terreno	82
3.2.4 Fator estatístico S_3 – NBR 6123:1988	83
3.3 NORMA AMERICANA: ASCE 7-10: <i>MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES</i>	84
3.3.1 Velocidade básica do vento – ASCE 7-10: 2010	84

3.3.2 Pressão de velocidades – ASCE 7-10: 2010	85
3.3.3 Velocidade característica – ASCE 7-10: 2010	85
3.3.4 Fator de exposição de pressão de velocidades – ASCE 7-10: 2010	86
3.3.5 Fator de direcionalidade do vento – ASCE 7-10: 2010	87
3.3.6 Fator topográfico – ASCE 7-10: 2010	87
3.4 NORMA AUSTRALIANA/NEOZELANDESA: AS/NZS 1170.2	90
3.4.1 Velocidade regional do vento – AS/NZS 1170.2	90
3.4.2 Multiplicador de terreno/altura – AS/NZS 1170.2	91
3.4.3 Multiplicador de direcionalidade – AS/NZS 1170.2.....	92
3.4.4 Multiplicador de proteção – AS/NZS 1170.2	92
3.4.5 Multiplicador topográfico – AS/NZS 1170.2	93
3.5 NORMA CANADENSE– NBCC – NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA	96
3.5.1 Velocidade média do vento – NBCC	97
3.5.2 Fator de exposição – NBCC	97
3.5.3 Velocidade incremental do vento incidente em morros e taludes – NBCC	98
3.6 NORMA EUROPÉIA: EN 1991 – EUROCODE 1: ACTIONS ON STRUCTURES – CEN TC 250	100
3.6.1 Velocidade básica do vento – EUROCODE 1	101
3.6.2 Velocidade média do vento – EUROCODE 1	101
3.6.3 Fator de rugosidade do terreno – EUROCODE 1	102
3.6.4 Fator topográfico – EUROCODE 1	103
3.7 NORMA JAPONESA: ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN – AIJ: RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINGS	108
3.7.1 Velocidade básica e de projeto do vento – AIJ	108
3.7.2 Fator de direcionalidade do vento – AIJ	109
3.7.3 Fator do perfil de velocidades do vento – AIJ	109
3.7.3.1 Fator de exposição para terrenos planos – AIJ	109
3.7.3.2 Fator topográfico – AIJ	110
3.8 MODELO ANALÍTICO DE JACKSON E HUNT (1975)	113
3.9 MODELO ANALÍTICO DE LEMELIN ET AL. (1988)	118
3.10 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS NORMAS	122
4 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO: METODOLOGIA EXPERIMENTAL ADOTADA	129
4.1 INTRODUÇÃO	129
4.2 TEORIA DA SEMELHANÇA	130

4.3 REPRODUÇÃO DA CAMADA LIMITE	132
4.4 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN	134
4.4.1 Simulação do vento natural	136
4.4.2 Instrumentação e Aquisição de dados	137
4.5 MODELOS REDUZIDOS	139
4.5.1 Primeira etapa da pesquisa	139
4.5.2 Segunda etapa da pesquisa	146
4.5.3 Terceira etapa da pesquisa	160
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	166
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	166
5.1.1 Resultados experimentais e análises para a primeira etapa: morros sem extensão do cume e sem patamares intermediários a barlavento	166
5.1.1.1 Análise de resultados para a primeira etapa da pesquisa: posição B0	169
5.1.1.2 Análise de resultados para a primeira etapa da pesquisa: posição P0	173
5.1.1.3 Análise de resultados para a primeira etapa da pesquisa: posição S	178
5.1.2 Resultados experimentais e análises para a segunda etapa: morros com extensão do cume e sem patamares intermediários a barlavento	182
5.1.2.1 Análise de resultados para a segunda etapa da pesquisa: posição B0	185
5.1.2.2 Análise de resultados para a segunda etapa da pesquisa: posição P0, P150, P300 e P450	189
5.1.2.3 Análise de resultados para a segunda etapa da pesquisa: posição S	193
5.1.3 Resultados experimentais e análises para a terceira etapa: morros com patamares intermediários a barlavento	195
5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM AS NORMAS ESTUDADAS	201
5.2.1 Terreno Plano	202
5.2.2 Comparativo entre os modelos experimentais e resultados analíticos	203
5.3 PROPOSIÇÃO DE FORMULAÇÃO PARA O FATOR TOPOGRÁFICO DA NBR 6123	211
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	222
6.1 CONCLUSÕES	222
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	224
REFERÊNCIAS	225
APÊNDICE A	233

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática das regiões que formam a camada limite	38
Figura 2: Representação esquemática da localização da camada limite	39
Figura 3: Representação esquemática da circulação atmosférica	39
Figura 4: Perfil de velocidades para os ventos: sinótico (a) e não-sinótico (b)	40
Figura 5: Representação esquemática do perfil de velocidades médias influenciado pela presença de morros e taludes	42
Figura 6: Representação esquemática do escoamento do vento, da separação e da região da esteira	42
Figura 7: Representação esquemática de morros 2D (a) e 3D (b)	47
Figura 8: Linhas de contorno de mesmo fator de amplificação para os diferentes taludes, estudo de Bowen e Lindley (1977)	50
Figura 9: Estudo de Meroney et al. (1976): perfil de velocidades para diferentes pontos a barlavento	51
Figura 10: Estudo de Nørstrud (1982): representação esquemática da forma dos morros	52
Figura 11: Estudo de Cao e Tamura (2006): representação esquemática das características de ensaio para um morro rugoso	53
Figura 12: Estudo de Cao e Tamura (2007): Representação esquemática dos morros estudados	54
Figura 13: Representação esquemática da razão de aspecto $(L/2)/H$ para os estudos de Arya et al. (1987)	55
Figura 14: Estudos de Arya et al. (1987): perfis de velocidades normalizados para os modelos com razão de aspecto 3 (a), 5 (b) e 8 (c)	56
Figura 15: Estudo de Kim et al. (1997): perfis de velocidades para o morro isolado S3H4	58
Figura 16: Estudo de Kim et al. (1997): perfis de velocidades para morros múltiplos com combinação S3H4-S3H7.....	58
Figura 17: Estudo de Carpenter e Locke (1999): morros sinusoidais e morros múltiplos	59

Figura 18: Estudo de Carpenter e Locke (1999): morro sinusoidal baixo com patamares intermediários, apresentados em conjunto na figura, mas ensaiados individualmente	60
Figura 19: Estudo de Miller e Davenport (1998): perfil de velocidades para morros sinusoidais consecutivos, sendo, a linha pontilhada o perfil para o escoamento livre e, a linha cheia, o perfil no cume	62
Figura 20: Análise da região da esteira, pontos de separação e recolamento do escoamento para as inclinações 0,3 (a), 0,45 (b) e 0,60 (c), speed-up no cume do morro (d)	63
Figura 21: Seções transversais utilizadas para as análises numéricas CFD: standard (a), case 2 (b) e case 3 (c)	64
Figura 22: Esquematização dos pontos de separação e recolamento do escoamento quando esse encontra um obstáculo	74
Figura 23: Gráfico de isopletas da velocidade básica (V_o), em m/s: NBR 6123	78
Figura 24: Fator topográfico para taludes (a) e morros (b): NBR-6123	79
Figura 25: Esquematização de talude (a) e morro (b) (ASCE-7-10) (fonte: adaptado ASCE, 2010)	88
Figura 26: Esquematização de talude (a) e morro (b) (AS/NZS 1170.2)	95
Figura 27: Esquematização da zona de separação em cumes de morros (AS/NZS 1170.2)	96
Figura 28: Esquematização de talude (a) e morro (b) (NBCC)	100
Figura 29: Esquema levantamento de dados para cálculo da velocidade incremental de talude (a) e morro (b) (EUROCODE 1)	104
Figura 30: Esquematização para talude (a) e morro (b) (AIJ – Recommendations for Loads on Buildings)	112
Figura 31: Esquematização para morro em forma de sino (modelo analítico de Jackson e Hunt (1975)	116
Figura 32: Esquematização para morro triangular (modelo analítico de Jackson e Hunt (1975)	116
Figura 33: Esquematização para talude (modelo analítico de Jackson e Hunt (1975)	117
Figura 34: Esquematização da velocidade incremental do vento em morros e taludes (modelo analítico de LSD)	119
Figura 35: Esquematização dos parâmetros (modelo analítico de LSD)	120

Figura 36: Emprego das Leis Logarítmica, de Potência e da formulação de Deaves & Harris para definição do perfil de velocidades em cada norma	124
Figura 37: Exemplo de arranjo de dispositivos para formação da camada limite atmosférica	134
Figura 38: Esquema das mesas do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann	135
Figura 39: Perfil vertical de velocidades médias normalizadas para $p=0,11$	137
Figura 40: Perfil vertical de velocidades de intensidade de turbulência local para $p=0,11$	137
Figura 41: Esquema de aquisição por meio de anemometria de fio quente	138
Figura 42: Detalhe da sonda de fio quente utilizada nos ensaios experimentais	139
Figura 43: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais, com ângulo de 20° , 3D (a) e 2D (b)	141
Figura 44: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais, com ângulo de 45° , 3D (a) e 2D (b)	142
Figura 45: Vista lateral do modelo reduzido sinusoidal para ângulo 45° 3D (a) e 2D (b)	143
Figura 46: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares, com ângulo de 20° , 3D (a) e 2D (b)	144
Figura 47: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares, com ângulo de 45° , 3D (a) e 2D (b)	145
Figura 48: Vista lateral do modelo reduzido triangular para ângulo 45° 3D (a) e 2D (b)	145
Figura 49: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 20° e extensão do cume de 1H	147
Figura 50: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 20° e extensão do cume de 3H	148
Figura 51: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de 1H	149
Figura 52: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de 3H	150
Figura 53: Modelo reduzido sinusoidal 3D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a 1H	151
Figura 54: Modelo reduzido sinusoidal 2D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a 1H	152

Figura 55: Modelo reduzido sinusoidal 3D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a $3H$	152
Figura 56: Modelo reduzido sinusoidal 2D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a $3H$	153
Figura 57: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de $1H$	154
Figura 58: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 20° e extensão do cume de $3H$	155
Figura 59: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de $1H$	156
Figura 60: Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de $3H$	157
Figura 61: Vista superior do modelo reduzido triangular 3D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $1H$	158
Figura 62: Vista superior do modelo reduzido triangular 2D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $1H$	158
Figura 63: Vista superior do modelo reduzido triangular 3D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $3H$	159
Figura 64: Vista lateral do modelo reduzido triangular 2D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a $3H$	159
Figura 65: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 1 patamar intermediário de $0,5H$	160
Figura 66: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 2 patamares intermediários de $0,5H$	161
Figura 67: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 1 patamar intermediário de $1H$	161
Figura 68: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 2 patamares intermediários de $1H$	162
Figura 69: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45° , com 1 patamar intermediário de $0,5H$	163
Figura 70: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45° , com 2 patamares intermediários de $0,5H$	163
Figura 71: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45° , com 1 patamar intermediário de $1H$	164

Figura 72: Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45°, com 2 patamares intermediários de 1H	164
Figura 73: Modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45°, com 2 patamares intermediários de 0,5H (a) e 1H (b)	165
Figura 74: Resultados experimentais para os morros da primeira etapa com ângulo de 20°	167
Figura 75: Resultados experimentais para os morros da primeira etapa com ângulo de 20	168
Figura 76: Resultados experimentais para os morros da primeira etapa, posição de análise B0	169
Figura 77: Estudo comparativo da variável ângulo, posição de análise B0	170
Figura 78: Estudo comparativo da variável dimensionalidade, posição de análise B0 ..	171
Figura 79: Estudo comparativo da variável seção transversal, posição de análise B0 ...	172
Figura 80: Resultados experimentais para os morros da primeira etapa, posição de análise P0	173
Figura 81: Estudo comparativo da variável ângulo, posição de análise P0	175
Figura 82: Estudo comparativo da variável dimensionalidade, posição de análise P0 ...	176
Figura 83: Estudo comparativo da variável seção transversal, posição de análise P0	177
Figura 84: Resultados experimentais para os morros da primeira etapa, posição de análise S	178
Figura 85: Estudo comparativo da variável ângulo, posição de análise S	179
Figura 86: Estudo comparativo da variável dimensionalidade, posição de análise S	181
Figura 87: Estudo comparativo da variável seção transversal, posição de análise S	182
Figura 88: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 20° e extensão do cume igual a P1H	183
Figura 89: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 45° e extensão do cume igual a P1H	184
Figura 90: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 20° e extensão do cume igual a P3H	184
Figura 91: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 45° e extensão do cume igual a P3H	185

Figura 92: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise B0	186
Figura 93: Estudo comparativo entre a extensão do cume P1H e P3H e o modelo P0H, posição de análise B0	188
Figura 94: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P0	189
Figura 95: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P150	190
Figura 96: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P300	190
Figura 97: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P450	191
Figura 98: Estudo comparativo entre a extensão do cume P1H e P3H e o modelo P0H, posição de análise P0	192
Figura 99: Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise S	194
Figura 100: Estudo comparativo da variável ângulo para a segunda etapa, posição de análise S	195
Figura 101: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 1 patamar intermediário de comprimento de 75 mm (I1C075)	196
Figura 102: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 2 patamares intermediários de comprimento de 75 mm (I2C075)	197
Figura 103: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 1 patamar intermediário de comprimento de 150 mm (I1C150)	197
Figura 104: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 2 patamares intermediários de comprimento de 150 mm (I2C150)	197
Figura 105: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, incrementos máximos entre os modelos e o perfil referência	199
Figura 106: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, comparativos entre os modelos com comprimento de talude de 75 mm (a) e com 150 mm (b)	200
Figura 107: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, comparativos entre os modelos com mesmo número de patamares intermediários, um patamar (a) e dois patamares (b)	200
Figura 108: Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, comparativos entre os modelos para o mesmo ângulo, 20° (a) e 45°(b)	201

Figura 109: Perfil de velocidades normalizadas para terreno plano categoria II	202
Figura 110: Comparativo analítico e experimental para os modelos da primeira etapa, posição B0	204
Figura 111: Comparativo analítico e experimental para os modelos da primeira etapa, posição P0	204
Figura 112: Comparativo analítico e experimental para os modelos da primeira etapa, posição S	205
Figura 113: Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os modelos 20° (a) e 45°(b), posição P0	207
Figura 114: Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os modelos 20° (a) e 45°(b), posição P150	207
Figura 115: Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os modelos 20° (a) e 45°(b), posição P300	208
Figura 116: Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os modelos 20° (a) e 45°(b), posição P450	208
Figura 117: Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 45°, posição P0	209
Figura 118: Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 45°, posição P150	210
Figura 119: Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 45°, posição P300	210
Figura 120: Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 45°, posição P450	211
Figura 121: Representação esquemática dos parâmetros para o fator topográfico para a proposição da NBR 6123	213
Figura 122: Comparativo experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D-Morros	217
Figura 123: Comparativo experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 3D-Morros	217
Figura 124: Comparativo experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D-Taludes	218

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores topográficos experimentais para 2D-Morros	214
Tabela 2: Fatores topográficos experimentais para 3D-Morros.	214
Tabela 3: Fatores topográficos experimentais para 2D-Taludes.	215
Tabela 4: Diferença percentual entre fator topográfico experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D-Morros	219
Tabela 5: Diferença percentual entre fator topográfico experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 3D-Morros	220
Tabela 6: Diferença percentual entre fator topográfico experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D-Taludes	221

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Fatores meteorológicos (NBR 6123)	83
Quadro 2: Valores mínimos do fator S3 (NBR-6123)	83
Quadro 3: Parâmetros α , Z_g (ASCE 7-10)	87
Quadro 4: Parâmetros μ e γ (ASCE 7-10)	89
Quadro 5: Multiplicador de terreno/altura para regiões A/B/W e C/D (AS/NZS 1170.2)	91
Quadro 6: Multiplicador de proteção (AS/NZS 1170.2)	92
Quadro 7: Multiplicador de forma do morro (AS/NZS 1170.2)	96
Quadro 8: Parâmetros p^{**} e $\Delta V_{m\acute{a}x}$ (NBCC)	98
Quadro 9: Categorias de terrenos e parâmetros Z_0 e Z_{min} (EUROCODE 1)	102
Quadro 10: Categorias em função da condição do terreno (AIJ)	110
Quadro 11: Parâmetros para determinação do fator de exposição (AIJ)	110
Quadro 12: Parâmetros para determinação do fator topográfico para taludes (AIJ)	113
Quadro 13: Parâmetros para determinação do fator topográfico para morros (AIJ)	113
Quadro 14: Parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental de morros 3D e cumes /vales 2D (modelo analítico de LSD)	121
Quadro 15: Parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental de taludes 2D (modelo analítico de LSD)	121
Quadro 16: Comparação entre as formas de definição das velocidades básicas nas normas analisadas	122
Quadro 17: Comparação entre a forma de classificação, pelas normas, nas categorias de exposição	124
Quadro 18: Comparação entre categorias de exposição	125
Quadro 19: Comparação entre o comprimento de rugosidade Z_0 das normas analisadas	126
Quadro 20: Comparação entre os limites inferior e superior das inclinações de terreno consideradas das normas	127

Quadro 21: Comparação entre a área de abrangência horizontal de normas sobre a ação do vento em edificações	127
Quadro 22: Comparação entre valores máximos e mínimos da altura acima do terreno nas quais ocorrem variações na velocidade do vento	128
Quadro 23: Valores de V/V_{450} a uma altura de 10 m e a diferença em porcentagem em relação a NBR 6123	203
Quadro 24: Coeficientes A, B, C e D para a proposição de nova formulação da NBR 6123	212

LISTA DE SIGLAS

ASCE – *American Society of Civil Engineering Standard*

AIJ – *Architectural Institute of Japan*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

2D – bidimensional

CLA – Camada Limite Atmosférica

CEN-TC – *Comité Européen de Normalisation – Technical Committee*

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

UFRGS – *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

CFD – *Computer Fluid Dynamics*

LISTA DE SÍMBOLOS

- A, B – parâmetros para a norma Europeia, adimensional
- A, B, C, D – coeficientes para a proposição de nova formulação da NBR 6123
- a, n, p – parâmetros para o modelo LSD, adimensionais
- 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_g – fator de efeito de rajada, para a norma Canadense, adimensional
- C_T – fator topográfico para emprego em morros e taludes, para a norma Canadense, adimensional
- C_s – fator de época do ano, 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

$K_D; M_D; C_D$ – 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_t – 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, L – distância à barlavento a partir da crista para onde a diferença de elevação do solo é metade da altura do morro ou talude, em metros

L_u – distância à barlavento do sopé ao cume do morro para a norma europeia, em m

L_d – distância à sotavento do cume ao sopé do morro para a norma europeia, em m

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

$M_{Z,cat}$ – 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_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^{**} – coeficiente de redução da velocidade incremental com a altura para a norma Canadense, adimensional

q_z – pressão de velocidades para norma Americana, 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_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_{AII} – 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

y_0 – comprimento de rugosidade do terreno

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 – 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

$\Delta u_{(x,Z)}$ – 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

ΔS_{\max} – velocidade incremental do vento para a norma Canadense

ΔS – velocidade incremental para a norma Canadense

ΔV_{\max} – velocidade incremental do vento para o modelo LSD

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

$\sigma_u(x,Z)$ – 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

δ – espessura da camada limite atmosférica, em m

1 INTRODUÇÃO

O movimento das massas de ar sobre a superfície terrestre, também chamado de vento, é originado pelas diferenças de pressão atmosférica. Estas diferenças existem, pois, a energia proveniente do sol provoca diferenças de temperatura, fazendo com que partes da atmosfera estejam mais aquecidas que outras. Além disso, a circulação de ar é influenciada pelo aquecimento desigual ocasionado: pela diferença de latitude, pela rotação da terra em torno do seu próprio eixo e do sol e pelo tipo de cobertura terrestre (BLESSMANN, 2013).

As massas de ar, ao se aproximarem da superfície terrestre, têm suas propriedades (físicas) modificadas, bem como a sua velocidade. Deste modo, a região da atmosfera que influencia nestas massas é designada de troposfera, a qual pode variar entre uma altitude de 100 a 11.000 m acima do solo. Entre estes limites, mais precisamente entre 100 e, até, 3000 m, os processos de transporte são modificados e, assim, é originada a camada limite atmosférica (CLA). A região da troposfera acima dos 3000 m é chamada de atmosfera livre. As massas de ar ao se aproximarem da superfície terrestre geram forças superficiais com uma variação temporal de, aproximadamente, uma hora ou menos, que por sua vez influenciam o escoamento das massas de ar ou ventos. Estas forças podem ser originadas pelo atrito com o solo, transferência de calor, transpiração, evapotranspiração, emissão de poluentes e diferentes topografias da superfície terrestre (STULL, 1988).

Os ventos da camada limite atmosférica possuem velocidades variáveis e estas são descritas por um perfil de velocidades médias. Geralmente, as velocidades médias do vento são próximas a zero, na superfície terrestre, e aumentam, proporcionalmente, quanto maior a altitude. Esta variação do perfil de velocidades médias deve-se a influência da força de atrito gerado entre o solo e o vento. Esta força é contrária ao movimento do vento e seu efeito é retardar o escoamento do vento. Quanto maior for a distância acima do solo menor será a influência da força de atrito (SIMIU; SCANLAN, 1996).

O escoamento, ao transpor uma superfície irregular, ou seja, áreas formadas por morros, taludes ou penhascos, reorganiza suas linhas de corrente modificando as pressões e as velocidades sobre a topografia. A barlavento pode haver uma redução das velocidades, em relação ao escoamento livre, até determinado ponto onde aumenta até chegar ao cume da topografia. Na parte mais alta do morro ou talude é observado o fenômeno do *speed-up*. A região a sotavento apresenta

reduções das velocidades, e dependendo, da inclinação e altura do morro há a formação da região da esteira (MATTUELLA, 2012).

Na Engenharia Estrutural, um dos carregamentos empregados às edificações é a carga de vento. Por isso, é imprescindível que o comportamento do vento, por meio do perfil de velocidades, esteja adequado às condições a que esta edificação estará exposta, para que, assim, a estrutura seja corretamente dimensionada. Com o crescente avanço das cidades para áreas periféricas e regiões montanhosas, nota-se que muitas edificações são construídas no topo de morros e, até mesmo, em seus taludes. Esta é uma característica projetual que tem se tornado cada vez mais relevante para a Engenharia de Vento, visto que as características do perfil de velocidades do vento numa região como esta é diferente em comparação a de regiões planas.

Atualmente, além da construção de edificações em topo de morros, tem-se notado um aumento de parques eólicos construídos em regiões de terrenos complexos. Ao locar-se um aerogerador, além do dimensionamento da estrutura, considera-se o ganho de potência para a geração de energia eólica. Muitos estudos mostram que, aerogeradores construídos em morro em topo de morros e taludes, estes apresentam ganhos significativos de potência (MATTUELLA, 2012). Embora, nos últimos anos, se tenha um gradativo aumento de parques eólicos em regiões de terrenos complexos, há muita pesquisa para se desenvolver neste âmbito. Justifica-se isto pelas inúmeras incertezas que circundam as características do escoamento do vento em regiões com de terrenos complexos. Além da própria forma da topografia influenciar o perfil de velocidades do vento, a rugosidade da superfície, que também afeta as velocidades, deve ser considerada (LANGE et al., 2017).

Quando estas edificações são influenciadas por morro ou talude isolado de forma conhecida, como, por exemplo, sinusoidal (em forma de sino) ou triangular, as normativas existentes descrevem os perfis de velocidades com características muito parecidas com os resultados obtidos em túneis de vento e em campo, entretanto com respostas supervaloradas. Porém, para um terreno onde existam inúmeros morros e taludes posicionados aleatoriamente, não há normativa que considere o perfil de velocidades do vento adequadamente. Por conseguinte, é aconselhável lançar mão de estudos de campo ou ensaios experimentais em túnel de vento, os quais são capazes de reproduzir com maior acurácia o comportamento do escoamento nestas regiões. Nos códigos normativos, mesmo existindo tópicos específicos tratando de morros isolados, ao compará-las entre si ainda se percebe muitas discrepâncias. Com isso, torna-se

necessário um estudo analítico mais aprimorado da influência da topografia no perfil de velocidades do vento (SCOTTON, 2016).

O fator topográfico S_1 , segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), é o termo que considera o efeito da forma do terreno. Porém, este fator só considera a variação devido a existência de um morro ou talude isolado. Considera-se, igual a 1, quando o terreno é plano ou fracamente acidentado e, também, para os pontos no sopé de morros e taludes. Quando ocorre o afastamento do sopé de um morro ou talude em direção ao cume, seja a barlavento ou a sotavento, é obtido um fator topográfico diferente de 1. Esse, por sua vez, é influenciado pela diferença de nível, a altura medida no ponto considerado e a inclinação do morro ou talude.

A disparidade entre as normativas existentes pode ser explicada pelo fato de terem sido elaboradas e parametrizadas para uma região específica da Terra e, também, pelo método analítico adotado. Mattuella (2012), mostra que as normas internacionais estudadas, em geral, superestimam os valores das velocidades do vento quando comparados com os equivalentes obtidos em túnel de vento, tanto para morros simétricos como assimétricos nas inclinações de 24°, 32°, 52° e 68°. Além disso, a autora salienta que os modelos analíticos estudados não representam fielmente o perfil de velocidades dos ensaios experimentais em túnel de vento. Em geral, elas apresentam valores bem acima dos obtidos de forma experimental, para quaisquer declividades, seja em modelo 2D ou 3D. No que se refere a velocidade incremental, algumas normas não têm rotina de cálculo específica, como a Norma brasileira, que apresenta um fator de multiplicação, mas somente um incremento adotado para aquele ponto.

Scotton (2016), em sua dissertação de mestrado, obteve resultados semelhantes aos de Mattuella (2012, 2016). Os parâmetros utilizados em ambos os estudos foram os mesmos, alterando-se apenas os ângulos dos morros analisados. O estudo de Scotton (2016) analisou os ângulos de 13°, 20°, 35° e 45°, para morros sinusoidais 2D e 3D e as posições analisadas foram no topo do cume, a barlavento (meia altura) e a sotavento (meia altura). Scotton (2016) observou, assim como Mattuella (2016), que as normas divergem muito nos resultados, principalmente, quando se analisa a sotavento, em que, grande parte das normas, não reproduz o escoamento nessa região.

Como citado anteriormente, as autoras Mattuella (2012) e Scotton (2016) verificaram que grande parte das normas vigentes, no mundo, tendem a superestimar o valor do fator

topográfico. Além disto, em muitos casos, os resultados obtidos analiticamente não se aproximam aos medidos em túnel de vento e nem aos registrados em ensaios de campo. Este conservadorismo demasiado tem, por consequência direta, um maior consumo de materiais e, portanto, desperdício de matéria prima. Por outro lado, é importante salientar que o vento é um evento aleatório e possui inúmeras incertezas nos parâmetros que o influenciam, então não se pode afirmar que modelos analíticos estejam totalmente incorretos.

Assim, esta pesquisa limita-se a investigação dos fenômenos que são causados pelo escoamento da camada limite turbulenta, estavelmente neutra, em topografias bidimensionais e tridimensionais. Foram fabricados modelos reduzidos de topografia com seção transversal sinusoidal e triangular. As medições foram adquiridas para as seguintes posições: a barlavento, no cume, e, a sotavento para um mesmo modelo. Além disso, se estudaram modelos reduzidos com patamar intermediário a barlavento e modelos com o prolongamento do cume. A investigação foi realizada através de ensaios em túnel de vento e análise dos resultados frente à Norma nacional e a várias internacionais. Assim, obtidos os dados experimentais, foi realizado um estudo comparativo com as seguintes 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). Este estudo, também, analisou, além das normas, os seguintes modelos analíticos: de Jackson e Hunt (1975) e de Lemelin, Surry e Davenport (LEMELIN; SURRY; DAVENPORT, 1988).

1.1 REVELÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A construção em morros, por exemplo, de edifícios, pavilhões e aerogeradores, tem se tornado recorrente. Em muitos casos, são construídas nos cumes dos morros ou em suas encostas. Para a Engenharia do Vento, este é um tema amplamente discutido e que ainda demanda muitos estudos sobre o comportamento do vento ao transpor um morro. Grande parte da topografia brasileira é composta por relevos complexos em que um morro em análise pode estar sendo

influenciando por diversos outros adjacentes a ele. Entretanto, devido à aleatoriedade da disposição, da altura e da forma dos morros, é inviável que se estude terrenos complexos a fim de elaborar uma normativa. Desta forma, os estudos com topografias idealizadas são fundamentais para se conhecer o comportamento do escoamento ao contornar um morro e, conseqüentemente, obter uma ordem de grandeza para os valores do fator topográfico. Além disso, os ensaios experimentais de morros permitem controlar alguns parâmetros e aprofundar o estudo daqueles que influenciam de forma mais significativa no perfil de velocidades.

Para estimar o fator topográfico existem vários métodos dentre os quais se pode citar: as simulações numéricas, simulações de modelos reduzidos em túnel de vento, ensaios de campo e, por fim, a aplicação de modelos analíticos. Todos esses métodos têm um erro intrínseco, que pode ser atribuído à escolha de métodos equivocados, a erro humano ou pela falta de acurácia do equipamento utilizado. Dentre os métodos citados, o que mais se aproxima da realidade é o ensaio de campo. Porém, é ainda pouco utilizado por ser muito custoso. Grande parte dos pesquisadores opta por fazer modelos reduzidos em túnel de vento, por se ter maior controle das variáveis e resultados mais semelhantes aos obtidos em ensaios de campo.

Com um vasto banco de dados experimentais, Jackson e Hunt (1975) desenvolveram uma formulação analítica para o fator topográfico. Os resultados de seus estudos tornaram-se tão relevantes neste tema que serviram de base de várias normas. Outros pesquisadores, realizaram seus estudos por outros meios. Ayotte e Hughes (2004), Mattuella (2012) e Scotton (2016) optaram por realizar estudos apenas em túnel de vento, sendo estes estudos fonte de dados para modelagens numéricas. Kim et al. (1997) utilizaram, além do túnel de vento, as simulações numéricas.

Embora existam inúmeros estudos experimentais em túnel de vento tanto para morros isolados quanto múltiplos, há a necessidade de averiguar-se as características do perfil de velocidades do vento em morros e taludes nos quais exista, por exemplo, um patamar no topo ou patamares intermediários a barlavento. No que se refere as formulações analíticas das normas, nenhuma, entre as analisadas neste estudo, apresenta formulação analítica para morros com patamares no topo ou em posição intermediária. Nos estudos realizados por Mattuella (2012) e Scotton (2016), para modelos sinusoidais e perfil de velocidades localizado no cume, como anteriormente citado, os resultados obtidos pelas normativas são muito superiores aos de ensaios experimentais. Nos estudos de Scotton (2016), por exemplo, além do ponto localizado no cume, a autora obteve resultados experimentais para as faces a barlavento e a sotavento, e

constatou que as normas, no geral, não representam as mesmas variações na velocidade obtidas experimentalmente.

Dando sequência aos estudos propostos por Mattuella (2012) e Scotton (2016), com a intenção de aprimorar o conhecimento sobre o comportamento do vento frente a existência de morros, este estudo propõe analisar morros sinusoidais e triangulares, com e sem patamares. Os dados obtidos nesse estudo, serão processados para embasar uma nova formulação para a Norma brasileira, a fim de abranger configurações observadas com mais frequência atualmente e não contempladas na atual Norma.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O estudo desenvolvido nesta tese tem como objetivo a investigação da influência da topografia no perfil de velocidades do vento. Dessa forma, os objetivos da pesquisa são assim descritos:

- a) investigação do perfil de velocidades para morros isolados 2D e 3D, sinusoidais e triangulares;
- b) investigação da velocidade incremental do vento para morros isolados 2D e 3D, com e sem o prolongamento do cume, sinusoidais e triangulares;
- c) investigação da velocidade incremental do vento para morros isolados 2D e 3D, com e sem patamares intermediários, sinusoidais e triangulares;
- d) análise comparativa entre os dados obtidos em ensaios experimentais com os modelos analíticos analisados;
- e) revisão de modelos analíticos, com ênfase no fator topográfico, de normas técnicas:
 - brasileira: NBR-6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações (ABNT, 1988);
 - 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)
 - canadense: *National Building Code of Canada – NBCC (NRCC, 2010)*;
 - europeia: *European Standard: EUROCODE 1: Actions on Structures – CEN TC 250* (CEN, 2010);
 - japonesa: *Architetural Institute of Japan – AIJ (AIJ, 2004)*;
- f) revisão de modelos analíticos, com ênfase no fator topográfico, de:
 - de Jackson e Hunt (1975);
 - de Davenport, Surry e Lemelin (Davenport *et al.*, 1988).

- g) análise e compilação dos resultados obtidos para o desenvolvimento de uma nova formulação para a norma brasileira NBR-6123.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A pesquisa é dividida em seis capítulos. No primeiro, é feita uma explanação sobre tema de pesquisa, sua justificativa e seus objetivos. O capítulo 2 aborda uma breve revisão bibliográfica sobre a camada limite atmosférica e os conceitos de Engenharia do Vento necessários para a compreensão dos demais capítulos.

No capítulo 3, são abordados os principais modelos analíticos, a Norma brasileira e as principais normas vigentes no âmbito internacional. São, ainda, descritos os métodos analíticos de cálculo para o fator topográfico e, conseqüentemente, das velocidades que compõem o perfil de velocidades.

No quarto capítulo, descreve-se a técnica experimental adotada nos ensaios em túnel de vento. São, então, detalhados os métodos utilizados para a aquisição de dados, os modelos ensaiados e os demais detalhes vinculados aos ensaios.

No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos em túnel de vento e nas comparações com as normas e os modelos analíticos analisados. Neste mesmo capítulo, são realizadas as discussões sobre os resultados apresentados.

Para finalizar a tese, no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais sobre os resultados experimentais, as normas e os modelos analíticos utilizados para as comparações. E, por fim, sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O vento que escoar na camada limite atmosférica (CLA) tem como característica um perfil de velocidades variável. Próximo à superfície terrestre, a velocidade do vento é igual a zero e varia até uma altura em que a superfície terrestre não influencia mais no escoamento, tornando as velocidades constantes (STULL, 1988). O perfil de velocidades do vento é influenciado diretamente pelas condições da superfície terrestre, como a sua rugosidade e orografia do terreno. Com isso, é imprescindível que, ao determinar o perfil de velocidades atuante em um dado local, estejam bem definidas as condições do terreno para que o resultado obtido seja o mais realista possível. Neste capítulo são apresentados alguns conceitos básicos de Engenharia de Vento e um breve histórico de estudos experimentais em morros e taludes.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DO VENTO

Neste item, são abordados alguns conceitos da Engenharia do Vento que auxiliam no melhor entendimento dos demais capítulos. Os conceitos de camada limite atmosférica, vento e suas classificações, perfil de velocidades médias do vento e efeito do bloqueio em túnel de vento, são abordados neste item.

2.1.1 Camada Limite

Em 1904¹, Prandtl (1988 apud ANDERSON, 2005) descreveu o conceito de camada limite. A sua teoria consistia na aderência entre o fluido e um corpo sólido. Em outras palavras, que a velocidade relativa é igual a zero entre o fluido e o corpo sólido. Este autor demonstrou sua teoria através de experimento com um fluido de pequena viscosidade, tal como o ar e a água. Quando o fluido incidia sobre o corpo sólido, o pesquisador constatou que uma pequena camada sobre a superfície do corpo era afetada pela viscosidade do fluido e a denominou camada limite.

A camada limite é subdividida em três regiões: laminar, transição e turbulenta, conforme pode ser visualizado na figura 1. Na camada limite laminar, o escoamento é permanente e não há formação de redemoinhos. Na região de transição, por sua vez, o escoamento é mais instável: para um mesmo ponto de medição, a velocidade não é constante no tempo. Por fim, na região turbulenta há grandes flutuações das velocidades. O comprimento de atuação destas regiões

¹ QUENEY, P. The problem of airflow over mountains: A summary of theoretical studies. **Bull. Amer. Met. Soc.**, v. 29, p. 16-26, 1948.

pode ser calculado pela distância a partir da borda de ataque, que é definido como “X”, conforme a figura 2. Este comprimento depende da massa específica do fluido “ ρ ”, da sua viscosidade “ μ ” e da velocidade do escoamento não perturbado “V”. Esses, por sua vez, definem o número de Reynolds que apresenta a seguinte formulação: $Re = (V.X.\rho)/\mu = (V.X)/\nu$, sendo “ ν ” a viscosidade cinemática do vento (BLESSMANN, 2011).

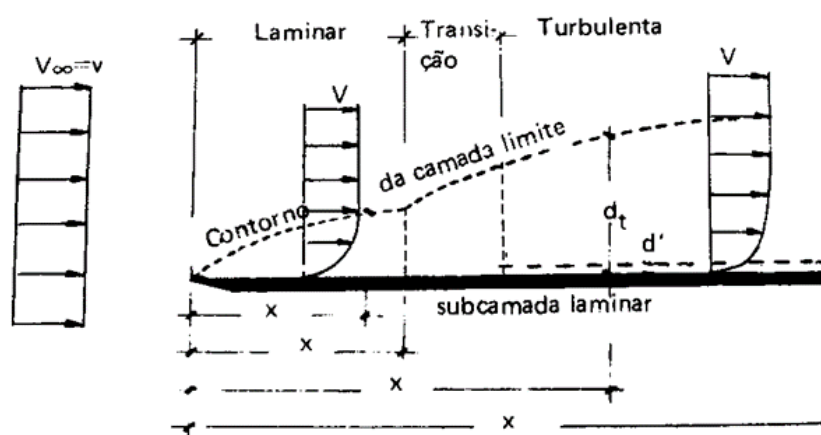


Figura 1 – Representação esquemática das regiões que formam a camada limite (fonte: adaptado de BLESSMANN, 2011)

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 valor típico para ventos fortes é em torno de 2500 m (LOREDO-SOUZA et al., 2004).

A região turbulenta da camada limite é a mais importante para aplicação da Engenharia do Vento, pois grande parte das superfícies estão expostas a este tipo de escoamento e é, nesta região, que acontece a separação do escoamento. No escoamento terrestre a região que ocorre os fenômenos meteorológicos é a troposfera, que é subdividida em atmosfera livre e camada limite (figura 2). A camada limite é a que recebe a maior influência da superfície terrestre e recebe o nome de Camada Limite Atmosférica (CLA) (STULL, 1988).

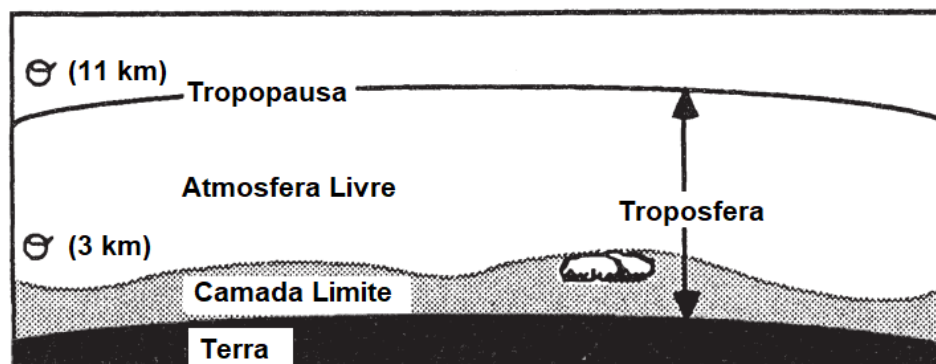


Figura 2 – Representação esquemática da localização da camada limite atmosférica (fonte: adaptado de STULL, 1988)

2.1.2 Vento

O vento é o movimento de massas de ar em relação à superfície terrestre. Este fenômeno é, fundamentalmente, causado pelo aquecimento solar variável da atmosfera. O deslocamento de massas de ar inicia-se pelo gradiente de pressão, causado por fenômenos termodinâmicos e mecânicos, entre pontos de mesma altitude. Embora o sol seja o principal emissor de calor, influenciando no aquecimento terrestre e no movimento das massas de ar, a superfície terrestre tem influência direta na atmosfera, pois forma a camada limite atmosférica. A superfície terrestre, em geral, é transparente à irradiação solar. Sendo assim, parte é absorvida e outra parte é refletida e, a parte que não é refletida ou dispersa, assume-se que é inteiramente absorvida pela Terra. A circulação terrestre do ar ocorre de zonas mais frias para as mais quentes conforme pode ser visualizado na figura 3 (SIMIU; SCANLAN, 1996).

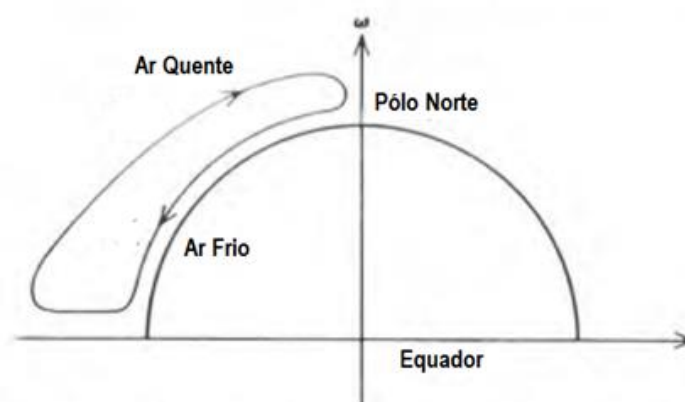


Figura 3 – Representação esquemática da circulação atmosférica (fonte: adaptado de SIMIU, SCANLAN., 1996)

A Terra reflete cerca de 42% da energia solar incidente, sendo responsáveis por esse fenômeno a atmosfera (ar, nuvens e poeira) e a crosta terrestre, principalmente, por regiões cobertas de gelo e neve. O restante da energia é absorvido pela atmosfera através de vapor de água, nuvens, ozônio, partículas de aerossol e, também, pela crosta terrestre. A absorção e irradiação da energia solar dependem, basicamente, do meio que recebe essas ondas de calor. Por exemplo, a absorção de energia é baixa para geleiras e alta para florestas. Devido a esta diferença de absorção entre os biomas se tem o aquecimento desigual da superfície terrestre e este é um dos fatores que influenciam a circulação atmosférica do ar, como descrito anteriormente. Além deste, outros fatores têm influência como por exemplo: a diferença de altitude e a rotação da terra sobre o movimento global da atmosfera (BLESSMANN, 2013).

2.1.3 Classificação do vento

A classificação dos ventos, quanto ao perfil de velocidades, é dividida em dois grupos: os sinóticos e os não-sinóticos. Os ventos sinóticos são aqueles que produzem um perfil de velocidades médias no qual as velocidades são nulas próximo à superfície, aumentam gradativamente até uma altura limite e, a partir disto, se tornam constantes. A representação esquemática dos ventos sinóticos está na figura 4a. Em outras palavras, formam um perfil de CLA que pode ser, analiticamente, representado pela lei de variação logarítmica ou exponencial. Os ventos não-sinóticos, como por exemplo *downbursts*, possuem um perfil de velocidades diferente e é apresentado na figura 4b. Estes não podem usar expressões logarítmicas ou exponenciais simples para sua representação, pois possuem grandes variações em sua conformação (LIN; SAVORY, 2006). Para o cálculo analítico do carregamento de vento, geralmente, são consideradas as características de ventos sinóticos ou de ciclones tropicais (DURAÑONA; STERLING; BAKER, 2007).

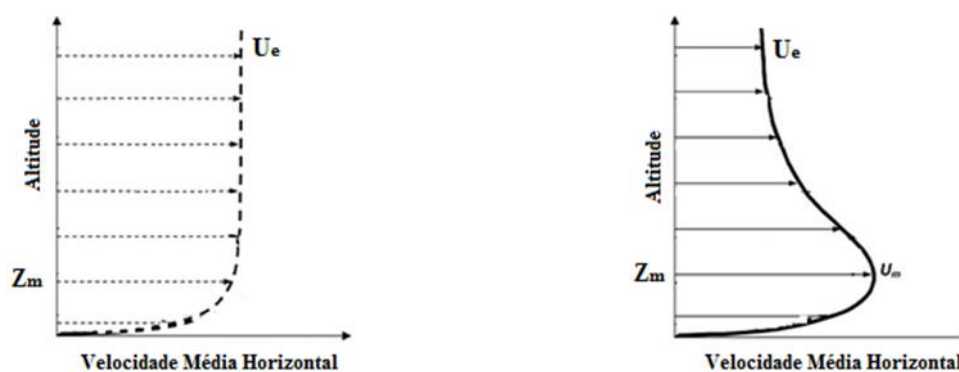


Figura 4 – Perfil de velocidades para os ventos: sinótico (a) e não-sinótico (b) (fonte: adaptado de LIN; SAVORY, 2006)

No início do século XXI, a hipótese de que os ventos gerados eram todos ventos sinóticos começou a ser repensada. Considerava-se, até então, que ventos mais fortes e extremos fossem sinóticos e que possuíssem características da camada limite, muito semelhantes àquelas que são encontradas em túnel de vento. Entretanto, percebeu-se em alguns fenômenos que o perfil de velocidades do vento se diferenciava do tradicional, e já conhecido, perfil de velocidades do vento de CLA. A principal característica observada no perfil de velocidades para ventos não sinóticos, geralmente, acontece em intervalos de tempo muito pequenos e com velocidade muito altas. Este aumento significativo das velocidades pode ser observado até, aproximadamente, 100 m acima da superfície. Um exemplo deste tipo de vento são as tormentas elétricas e o perfil de velocidades para este tipo de vento é exposto na figura b (HOLMES, 2003).

Para o melhor entendimento do efeito da topografia no perfil de velocidades do vento, utilizou-se, nesse estudo, o vento sinótico para os ensaios em túnel de vento. Ainda, neste capítulo, é apresentada uma breve revisão sobre a camada limite atmosférica em terrenos complexos.

2.1.4 Perfil de velocidades médias

As velocidades do vento, ao serem medidas em um ínfimo intervalo de tempo, apresentam uma pequena variação. Assim, para fins de estudo e simplificação, mede-se várias vezes a velocidade, em um intervalo de tempo, para uma mesma cota. Com esses valores, é obtida a velocidade média do vento para determinada cota acima do solo. Assim, o perfil de velocidades médias do vento é composto pela junção dos pontos que representam as velocidades médias para cada cota acima da superfície terrestre. Para ventos sinóticos, o perfil de velocidades médias é igual ao perfil do vento da CLA e pode ser aproximado pela lei logarítmica.

Como exposto, sabe-se que o perfil de velocidades é bastante influenciado pelas condições de contorno e, para o cálculo correto, se deve considerar o tipo de terreno e sua topografia, a rugosidade e o atrito. Estes são fatores importantes e modificam, consideravelmente, o perfil de velocidades resultante (STULL, 1988). A figura 5 mostra os perfis de velocidade do vento desde um terreno plano, como por exemplo mar aberto, até transpor uma topografia, que pode ser formada por morros, taludes e vales. Nesta figura 5, percebe-se as mudanças que ocorrem nas velocidades, principalmente, quando o vento se aproxima do morro, chega ao cume e o transpõe por completo. No cume do morro, fica evidente um aumento nas velocidades ou *speed-up* e, na região a barlavento e a sotavento, observa-se uma diminuição das velocidades próximos à superfície (TAN; FANG, 2018)

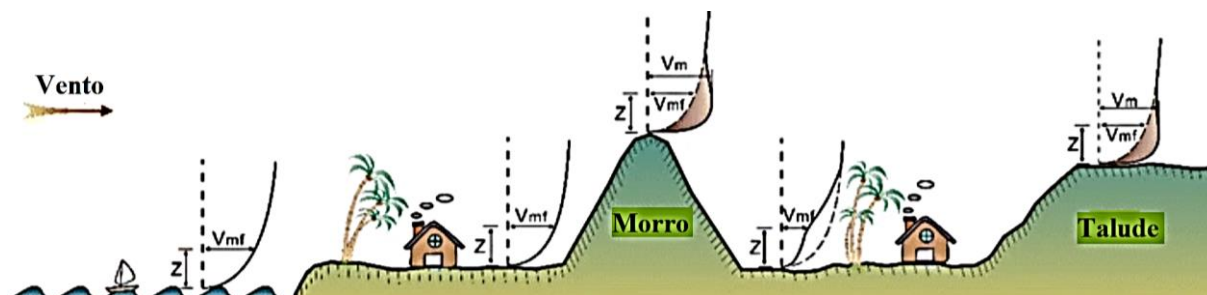


Figura 5 – Representação esquemática do perfil de velocidades médias influenciado pela presença de morros e taludes. Nota: Z (10 m), V_{mf} é a velocidade média do vento acima do terreno plano e V_m é a velocidade média do vento a uma altura Z (fonte: adaptado de TAN; FANG, 2018)

O escoamento do vento, ao transpor uma determinada topografia, além de ocasionar uma velocidade incremental no topo do morro, pode gerar os fenômenos de separação do escoamento e de formação da esteira à sotavento do morro (STULL, 1988). Blessmann (2011, p. 83) complementa que, para a ocorrência da separação do escoamento, é necessária a ação combinada de pequenas velocidades existentes na CLA e um gradiente adverso de pressão e destaca que “Além disso, a separação só pode ocorrer em um fluido real, cuja viscosidade produz a camada limite. O descolamento é, portanto, indiretamente causado pela viscosidade.”.

A sotavento do ponto de separação, próximo à superfície do morro, é observada a formação da esteira (figura 6). Este fenômeno é caracterizado pela existência de turbilhões de tamanhos e velocidades bastante variáveis, mas, geralmente, com velocidades menores que as do escoamento. Geralmente, a separação do escoamento acontece em zonas de baixa pressão e, conseqüentemente, a esteira terá baixa pressão, ou seja, caracteriza-se como zona de sucção (BLESSMANN, 2011). Na figura 6, observa-se que o ponto de separação do escoamento ocorre na quina a barlavento, posição “A”, e, a presença de turbilhões, ocorre tanto na região a sotavento do ponto de separação do escoamento, região “B”, quanto no próprio talude a barlavento, região “C”.

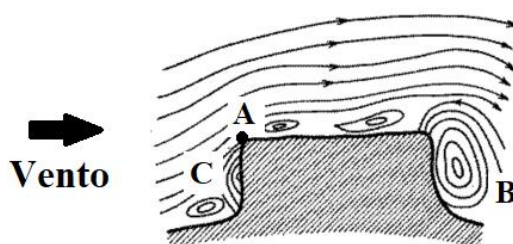


Figura 6 – Representação esquemática do escoamento do vento, da separação e da região da esteira (fonte: adaptado de WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1960).

2.1.5 Efeito do bloqueio em túnel de vento

O escoamento de um fluido, ao transpor um corpo rígido e simétrico, imerso em uma corrente de ar e limitado por paredes rígidas, está sujeito ao efeito de restrição de bloqueio. Isto acontece porque as paredes restringem o livre escoamento do ar pelo objeto, fazendo com que as velocidades próximas ao objeto sejam maiores do que seriam em um escoamento livre (MINISTRY OF AVIATION LONDON, 1963).

O efeito de bloqueio num túnel de vento é quantificado pela razão de bloqueio, a qual é a razão entre a área frontal do objeto que é atingido pelo escoamento e a área da seção transversal do túnel de vento. É desejável que essa razão de bloqueio seja a menor possível, pois, dessa forma, se entende que o objeto em análise é suficientemente pequeno, em relação a seção de ensaio, e, assim, evitar a excessiva distorção do escoamento (SAHINI, 2004). A norma americana ASCE-10 (2010) indica que a correção para o efeito de bloqueio seja realizada quando a razão for maior que 8%.

Noda et al. (1995) estudaram a influência de diferentes razões de bloqueio nas forças devidas ao vento, para camada limite turbulenta. As razões de aspecto do objeto estudado variavam entre 2 % a 16%. Os resultados obtidos pelos autores mostram que, para a região do topo e a sotavento da superfície, as pressões diminuem com o aumento da razão de bloqueio. Para a região a barlavento, não há uma significativa mudanças nas pressões e na forma da distribuição de pressões para as diferentes razões de aspecto. Entretanto, os autores salientam que os efeitos de bloqueio são notáveis na velocidade de separação do escoamento e na pressão na esteira.

Para amenizar os efeitos de bloqueio é necessário garantir que a razão de bloqueio seja suficiente pequena, de tal forma que não sejam necessárias correções. Holmes (2001) aconselha que a razão de bloqueio seja menor que 5%. O autor salienta que podem ser aceitas razões maiores desde que se façam as devidas correções. Barlow et al. (1999) orientam que o bloqueio em túnel de vento deve ser mantido abaixo de 10% e, preferencialmente, abaixo dos 5%.

As razões de bloqueio, neste estudo, para os modelos 2D são de 16,7%, para os modelos 3D de 20° e 45° há uma razão de bloqueio de 5,5% e 2,0%, respectivamente. Mesmo que, para os modelos 2D é aconselhável fazer a correção do efeito de bloqueio, optou-se em não os corrigir. O motivo pelo qual, optou-se em manter os dados sem correções, é devido ao fato de existirem divergências entre as próprias correções.

2.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS

Os primeiros estudos publicados sobre a CLA, em terrenos complexos, são da década de 1940. Queney² publicou, em 1948, através de uma nota técnica da *World Meteorological Organization*, uma revisão de modelos teóricos sobre escoamento não viscoso incidindo em montanhas e colinas. Nesta publicação, o autor menciona que as pesquisas teóricas realizadas dez anos antes da sua publicação sobre a influência de um morro no escoamento do vento, provam que grande parte das características observadas no escoamento podem ser explicadas pela teoria hidrodinâmica (QUENEY, 1948 apud WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1960). No ano seguinte, Scorer (1949) fez uma publicação na qual explanava sobre soluções analíticas para escoamento a sotavento de morros.

As pesquisas sobre o efeito topográfico no escoamento do vento são constantemente aprimoradas. Isto ocorre, pois, as diferentes propriedades da superfície, como geometria e altitude do terreno, rugosidade e distribuição de superfícies de terra e de água, influenciam no perfil de velocidades de vento, tanto na mesoescala como na microescala. Além disso, devido à má distribuição e à falta de estações anemométricas, as incertezas se tornam inerentes ao processo de simulação o que torna necessário a utilização de mais de um método de análise. Segundo o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (RS, 2002), 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 passa a ser superior a 10%.

2.2.1 Escoamento em terrenos planos

Os terrenos planos são aqueles cuja inclinação é inferior a 3° e é o tipo de topografia mais simples que pode ser encontrada na natureza. Os terrenos planos são classificados em homogêneos e não-homogêneos. O terreno plano homogêneo é aquele, cujas características da superfície e do entorno, não tem diferenças significativas quanto a rugosidade, tipo de solo, umidade, uso da terra, entre outros aspectos. As características do escoamento do vento, velocidade e direção, são determinadas pelo escoamento de origem sinótica. Dessa forma, o escoamento em terrenos planos homogêneos pode ser descrito por um modelo unidimensional

² QUENEY, P. The problem of airflow over mountains: A summary of theoretical studies. **Bull. Amer. Met. Soc.** v. 29, p. 16-26, 1948.

e o perfil de velocidades do vento e as temperaturas podem ser estimadas por uma simples parametrização (FINARDI et al., 1997).

Por outro lado, os terrenos planos não-homogêneos não apresentam uniformidade quanto às características superficiais e do entorno. São considerados, por exemplo, como terrenos planos não-homogêneos a transição entre a terra e o mar ou lago e as circulações da ilha de calor urbano. Nestas regiões há uma grande influência da temperatura durante o dia, visto que pela manhã e à tarde a temperatura é mais elevada que à noite. Desta forma, o escoamento em terrenos planos não-homogêneos não pode ser descrito por um modelo unidimensional e o perfil de velocidades do vento e as temperaturas não podem ser estimados por uma simples parametrização (FINARDI et al., 1997).

2.2.2 Escoamento em morros e taludes

Define-se, como morro, um monte pouco elevado, cuja altitude situa-se em torno de 200 m. Talude é definido como a superfície inclinada do terreno de um morro. Cume ou topo é a parte mais alta do morro, ou seja, a de maior altura desde o sopé até o maior ponto da elevação. Quanto a incidência do vento, barlavento é a região onde o vento incide e, à região oposta, dá-se o nome de sotavento, ou seja, a face que fica protegida do vento (IBGE, 1993).

A variabilidade topográfica causada por morros e taludes de condições superficiais semelhantes ou não, ocasionam mudanças significativas nas velocidades e na turbulência em seu entorno. A análise desta região é determinante para o estudo de transporte de poluentes, investigação de locais para geração de energia eólica e para o dimensionamento da carga de vento em edificações localizadas no entorno ou no próprio morro ou talude (MATTUELLA, 2012).

De uma maneira geral, Holmes (2001) define o escoamento, em morros e taludes isolados, da seguinte maneira: à medida que o escoamento se aproxima de uma mudança topográfica há, primeiramente, uma ligeira diminuição das velocidades até que a topografia comece a mudar sua inclinação de forma ascendente. Em seguida, as velocidades tendem a aumentar gradativamente até o cume do morro ou talude. Segundo estudos de Scotton (2016), os dados obtidos em túnel de vento, tanto para modelos de forma sinusoidal como triangular, mostram que para o ponto a barlavento a meia altura há uma diminuição das velocidades em relação ao perfil de velocidades referência. Já no ponto mais a sotavento, o cume da topografia, foram observadas as maiores velocidades, fenômeno chamado de *speed-up*. Este efeito ocorre pois, quando o vento se aproxima do cume do morro, as linhas de corrente, mais próximas da

superfície, se aproximam entre si diminuindo a pressão nesta região e, conseqüentemente, aumentando as velocidades. A região localizada a sotavento do morro, depois do cume, é a mais instável e é, nesta região, que a turbulência é muito alta e as velocidades, mais próximas da superfície do morro, são muito pequenas: cerca de 10% da velocidade não perturbada. Além disso, nesta região, ocorre o desprendimento de vórtices e tem-se a conseqüente formação da esteira de recirculação, que fica localizada mais próxima ao pé do morro (JACKSON; HUNT, 1975).

2.2.3 Geometria de morros e de taludes

A geometria de morros e de taludes, bem como as inclinações que estes possuem, influencia diretamente no escoamento do vento. Existem geometrias que aumentam consideravelmente as velocidades no topo do morro e, conseqüentemente, aumentam as cargas de vento. No estudo apresentado por Nøstrud (1982), o autor apresenta uma comparação entre cinco tipos de geometrias: elíptica, parabólica, cosseno quadrática, triangular e sinusoidal. Dos modelos estudados o que apresentou a maior amplificação da velocidade, no cume do morro, foi a geometria sinusoidal e, a que apresentou a menor, foi a elíptica. Ratificando os resultados de Nøstrud (1982), os pesquisadores Pearse, Lindley e Stevenson (Pearse et al., 1981), estudaram as geometrias sinusoidal e triangular. Como resultado, foi observado que a forma sinusoidal apresentou maiores incrementos de velocidades que a triangular no cume do morro. Segundo os autores, este resultado é devido à forma mais abrupta com que o escoamento transpõe essa geometria.

Na natureza, não são encontradas formas bem definidas, entretanto, para os cálculos de fator topográfico, são realizadas aproximações da topografia natural para uma forma idealizada. Com isso, pode-se ter divergências significativas nos valores de fator topográfico entre os ensaios de campo e os resultados analíticos.

2.2.4 Dimensionalidade dos morros e taludes

A dimensionalidade do morro ou talude influencia no comportamento do escoamento do vento em torno da topografia. Morros 3D tendem a perturbar menos o escoamento do vento que morros 2D com mesma seção transversal (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1960). A figura 7a apresenta a seção bidimensional que tem, a seção transversal ao vento, mais alongada em relação ao modelo tridimensional (figura 7b). Além disso, nas figuras 7a e 7b,

pode-se observar as diferenças nos escoamentos entre morros 2D e 3D. O escoamento, ao transpor um morro, tem suas linhas de corrente confinadas em toda a sua parte frontal na qual o vento incide. Este fato varia em relação ao comprimento deste obstáculo. Assim, um morro é classificado como sendo 2D, caso a sua dimensão longitudinal for muito maior que as demais. Para um morro 3D, as linhas de corrente são confinadas em um comprimento bem menor. As linhas de corrente, para a situação 2D, tendem a contornar o morro, predominantemente, pela sua parte superior. Por sua vez, para o caso 3D, as linhas de corrente contornam, também, pela lateral. Quando as linhas de corrente contornam um corpo sólido, a pressão próxima ao corpo diminui, fazendo com que a velocidade do escoamento aumente. Nos próximos subitens, são abordados, de forma distinta, alguns estudos sobre modelos 2D e 3D.

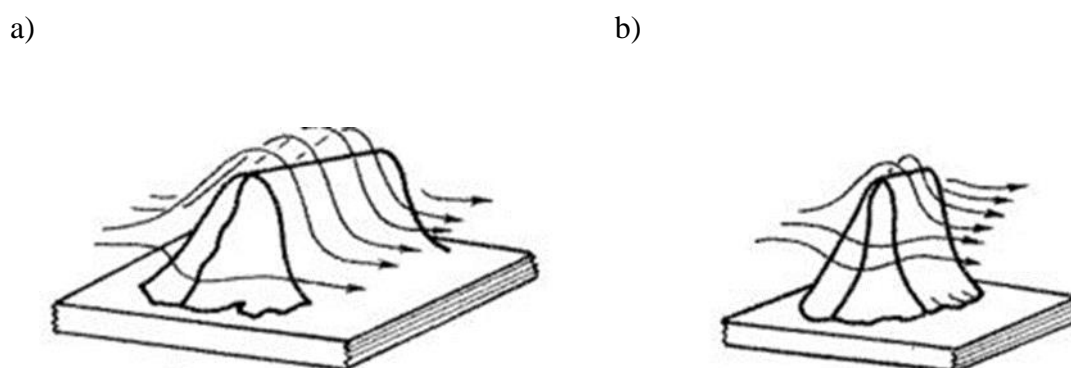


Figura 7 – Representação esquemática de morros 2D (a) e 3D (b) (fonte: adaptado de WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1960)

2.2.4.1 Estudos de modelos 2D

Os primeiros estudos sobre a influência da topografia no escoamento do vento datam da década de 1940, porém, foi na década de 1950, que se observa grande quantidade de publicações. Num dos primeiros estudos, publicado em 1949, o pesquisador analisou, analiticamente, o comportamento do escoamento a sotavento de um morro considerando somente duas dimensões (2D) e o estendeu para morros 3D. Porém, sua teoria abrangia apenas os escoamentos invíscidos, isotrópicos e pouco perturbados (SCORER, 1949). Alguns anos depois, em 1955, o mesmo autor estudou a influência de montanhas e colinas na separação do escoamento de camada limite. Neste estudo, ele demonstra que, próximo da superfície do morro, a velocidade do vento aumenta significativamente e, em consequência disto, o modo estacionário da camada de atrito é perturbado (SCORER, 1955).

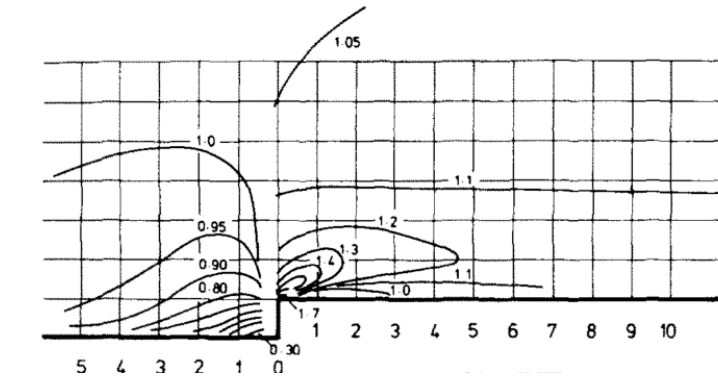
Em 1975, após muitos anos desde os primeiros indícios de variabilidade de velocidades no entorno de morros, os pesquisadores Jackson e Hunt desenvolveram modelos analíticos 2D, com escoamento em camada turbulenta, para um morro de pequena altura e isolado. Até hoje, estes autores são considerados referência devido à grande relevância de seus estudos e estes serviram de base para pesquisas posteriores e códigos normativos. O modelo analítico, embora tenha sido parametrizado para morros isolados com pequena inclinação, é conciso e apresenta mudanças para as velocidades médias do vento e para a estrutura da turbulência nessas circunstâncias. Além disso, os autores estudaram a razão entre a altura do morro e o seu comprimento característico na direção do escoamento. Frente a isto, os pesquisadores indicavam que os morros baixos e isolados interferem no escoamento do vento. Os pesquisadores observaram que a velocidade e os esforços de corte eram proporcionais à forma, tamanho e rugosidade do objeto em estudo (JACKSON; HUNT, 1975).

Mason e Sykes (1979) e Teunissen (1983) lançaram mão das formulações de Jackson e Hunt (1975) e extrapolaram-nas para morros 3D. Diferentemente, Jensen (1983) utilizou as formulações para comparar com medições de campo de um talude 2D. As medições foram realizadas em um trecho da Península de Riso, na Itália, durante os anos de 1974 e 1975. Após a comparação com a teoria de Jackson e Hunt (1975), o pesquisador observou que esta teoria não é consistente para a previsão do perfil de velocidades em taludes. O talude estudado por Jensen (1983) tem uma inclinação de 4:1 (comprimento x altura) e foi estudado experimentalmente por Bowen e Lindley (1977), que será detalhado na sequência.

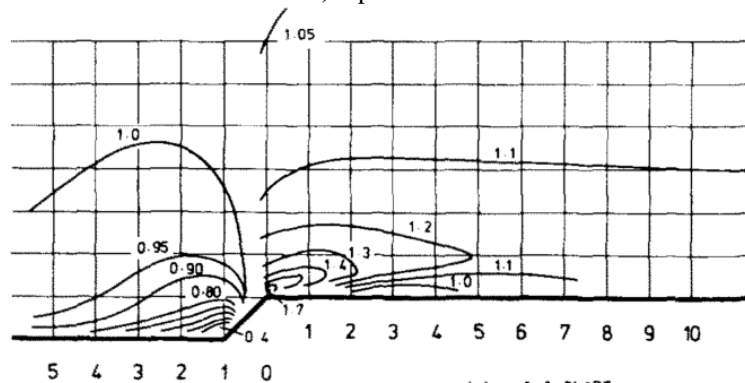
Na mesma linha de pesquisa dos autores supracitados, outros estudos analíticos foram desenvolvidos. Entretanto, medições em campo se tornaram de alto custo e demoradas fazendo com que os estudos experimentais, em túnel de vento, ganhassem mais espaço no meio acadêmico. Os estudos experimentais, em túnel de vento, mostraram ser uma solução mais rápida e indispensável para um melhor entendimento do comportamento do escoamento do vento, principalmente quando envolve morros, taludes ou terrenos de alta complexidade.

Bowen e Lindley (1977) realizaram estudos experimentais em túnel de vento, nos quais ensaiaram taludes 2D com uma camada limite neutramente estável. As declividades dos taludes foram 4:1, 2:1 e 1:1 (comprimento x altura), além de um talude com 90° de inclinação, ou seja, um penhasco, e a altura dos modelos é de 50 mm. O estudo observou as velocidades do vento em três alturas distintas: H, 4H e 10H e os perfis de velocidades foram medidos a barlavento, no cume e a sotavento. A figura 8 mostra os contornos de mesma amplificação para as diferentes

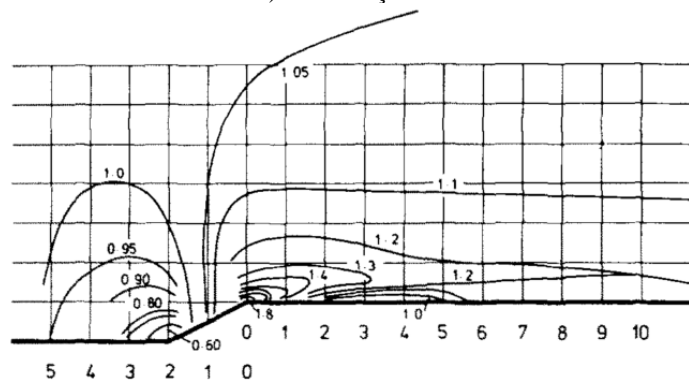
posições medidas e diferentes inclinações estudadas. A maior amplificação, que aconteceu no cume do morro de inclinação 2:1, é de 1,8, para as demais inclinações a amplificação foi de aproximadamente 1,7. A barlavento do talude, as amplificações do perfil de velocidades ficaram entre 0,3 e 1. No cume do talude, estes valores variaram entre 1,05 e 1,8. E, na região a sotavento do talude, os valores variaram entre 1 e 1,4. A partir da cota correspondente a 6H, a partir do cume, os perfis de velocidades se mantiveram invariáveis.



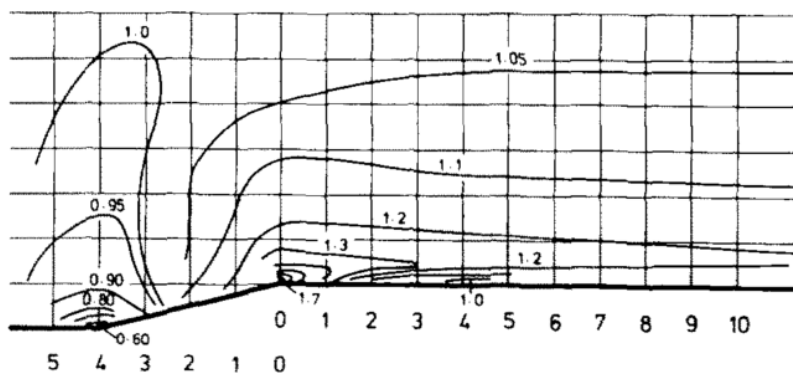
a) penhasco



b) inclinação 1:1



c) inclinação 2:1



d) inclinação 4:1

Figura 8 – Linhas de contorno de mesmo fator de amplificação para os diferentes taludes, estudo de Bowen e Lindley (1977) (fonte: adaptado de BOWEN; LINDLEY, 1977)

Quanto à intensidade de turbulência do escoamento do vento, os maiores valores aconteceram, a sotavento do cume, na região da esteira. Para um talude com ângulo de 90° foi de 0,6, para a inclinação 1:1 foi de 0,5, e para as demais inclinações 2:1 e 4:1 foi de 0,3 (BOWEN; LINDLEY, 1977).

A forma do morro, como já mencionado, é um fator que influencia o perfil de velocidades. Para avaliar esse efeito, o estudo de Meroney et al. (1976) analisou duas formas distintas: $\frac{1}{2}$ seno e triangular, ambas 2D, com inclinações de 1:2, 1:3, 1:4, 1:6 e 1:20 e altura de 50 mm. Os modelos foram ensaiados em túnel de vento e os resultados foram comparados com o modelo analítico de Jackson e Hunt (1975). Para os ensaios, em túnel de vento, foi utilizado um perfil de velocidades médias, definido pela Lei de Potência, com coeficiente igual a 0,14. A rugosidade da superfície variou entre $3 \cdot 10^{-5}$ a $1,5 \cdot 10^{-4}$.

A figura 9 exemplifica o que acontece com o escoamento ao transpor o morro em estudo, sendo que x/L negativo indica o perfil de velocidades analisado a barlavento, x/L igual a zero é o perfil de velocidades no cume e x/L positivo indica o perfil de velocidades analisado a sotavento. Nos pontos analisados a barlavento, os estudos mostraram que no sopé do morro há uma redução das velocidades incrementais. A partir da metade da altura do morro ($x/L \sim -1$), as velocidades incrementais aumentam até chegar no topo do morro ($x/L = 0$), onde as velocidades incrementais são máximas. Isto pode ser observado na sequência de perfis da figura 9. Para as medições dos modelos $\frac{1}{2}$ seno os resultados do fator *speed-up* e do fator fracionado foram inferiores aos dos modelos triangulares equivalentes, o que corrobora com as medições de campo (MERONEY et al., 1976).

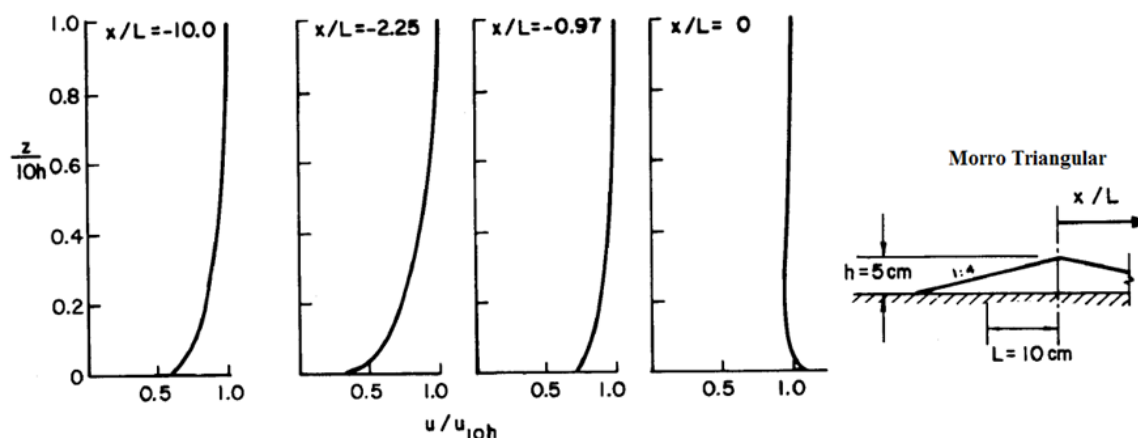


Figura 9 – Estudo de Meroney et al. (1976): perfil de velocidades para diferentes pontos a barlavento (fonte: adaptado de MERONEY et al., 1976)

Na mesma linha de pesquisa de Meroney et al. (1976), o estudo de Pearse et al. (1981) analisou morros 2D cujas formas eram triangular e sinusoidal. O estudo consistiu em ensaios experimentais, em túnel de vento, considerando relações H/L , ou seja, a razão da máxima altura do morro pela distância horizontal, que é definida a partir da máxima altura até a metade da altura do morro. Foram ensaiados quatro modelos com forma triangular, com razão H/L igual a 0,1, 0,3, 0,5 e 1, e três modelos de forma sinusoidal com razão H/L igual a 0,3, 0,5 e 1. A altura H dos morros era igual a 50 mm. A partir dos ensaios realizados, os autores observaram que, para morros triangulares e sinusoidais, o comportamento do escoamento do vento é similar: a barlavento há a redução das velocidades, no cume, se observam os maiores incrementos e, a sotavento, há a formação da região da esteira para razões de aspecto maiores que 0,5. O incremento de velocidades teve uma variação entre 0,5 e 1,0 para região a barlavento, entre 1,8 a 1,05 para o cume e, a sotavento, os incrementos tiveram variações entre 0,3 e 1,10. As maiores amplificações no cume do morro para cada modelo triangular 1,50, 1,80, 1,80 e 1,60, respectivamente, para as inclinações 1,0, 0,5, 0,3 e 0,1. Para os morros com seção transversal sinusoidal as amplificações foram iguais a 1,80. Na comparação entre os modelos 2D triangular e sinusoidal, o maior incremento de velocidades no cume (1,82) foi constatado para o modelo sinusoidal.

Com o intuito de verificar as possíveis diferenças no perfil de velocidades causadas pelas seções transversais dos morros, Nørstrud simulou, numericamente, cinco tipos de topografia: elíptica, parabólica, triangular, cosseno quadrática e sinusoidal. A figura 10 apresenta uma esquematização das seções transversais para morros triangulares, cosseno quadrática e sinusoidal. As formas foram analisadas em 2D, de altura moderadamente baixa e sem separação

do escoamento. Segundo o autor, quando comparada a forma sinusoidal à triangular, a maior amplificação no cume do morro acontece na forma sinusoidal. Isso corrobora com os resultados do estudo de Pearse et al. (1981). Além disso, o autor reforça que a razão H/L deve ser muito menor que 1 e não deve haver separação de escoamento (NØRSTRUD, 1982).



Figura 10 – Estudo de Nørstrud (1982): representação esquemática da forma dos morros (fonte: adaptado de NØRSTRUD, 1982)

Além da influência da forma e da inclinação do morro, anteriormente explanados, a rugosidade do terreno também pode modificar o escoamento do vento. No estudo de Britter, Hunt e Richards, foram realizados ensaios experimentais, em túnel de vento, de um morro senoidal 2D. Neste estudo, foram analisados os efeitos do escoamento e a velocidade em um morro 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 (1977) e Jackson e Hunt (1975), sendo constatado que há uma concordância entre os resultados dos estudos experimentais e analíticos, na região a barlavento do morro, podendo ser utilizada a formulação sugerida por superposição. Por outro lado, na região a sotavento do morro, não houve concordância, visto que quando há mudança de rugosidade é alterada, significativamente, a separação do escoamento e, conseqüentemente, não é adequado utilizar a superposição linear (BRITTER et al., 1981).

Em consoante ao estudo de rugosidade de Britter et al. (1981), tanto a rugosidade superficial quanto a do entorno do morro influenciam o perfil de velocidades do vento e devem ser consideradas no estudo. Grande parte dos estudos anteriormente descritos, levam em consideração um morro sem rugosidade, o que de certa forma é um modelo idealizado, pois não reflete a realidade em campo. Nos estudos de Ayotte e Huges (2004), os pesquisadores analisaram morros sinusoidais 2D, com e sem rugosidades, com inclinações de 0,2, 0,3, 0,4 e 0,6 (este só foi ensaiado para a versão do morro sem rugosidade) e altura de 50 mm. Para coletar os dados, foi utilizado o velocímetro *Laser Doppler* TSI 3D, cujo objetivo era medir com mais precisão o perfil de velocidades. Além dos dados obtidos em túnel de vento, os pesquisadores aplicaram a teoria linear proposta por Jackson e Hunt (1975). Algumas observações importantes, apresentadas pelos autores, remetem a ineficiência da teoria linear em prever o aumento máximo de velocidade na crista do morro íngreme, visto que pelas medições os valores

são, significativamente, inferiores aos previstos. Ao comparar os dados do túnel com o resultado analítico da teoria linear, os autores perceberam que há uma tendência da teoria linear superestimar os resultados. Além disso, a teoria não considera a parte não-linear da advecção (transmissão do calor pelo deslocamento de massa atmosférica no sentido horizontal) nas equações de movimento nem da separação do escoamento. Para a inclinação de 0,4, ficou evidente o efeito da separação do escoamento quando o morro era rugoso, frente a situação sem rugosidade (AYOTTE; HUGHES, 2004).

Ainda na mesma linha de pesquisa de Ayotte e Hughes (2004), os pesquisadores Cao e Tamura (2006) também investigaram como a rugosidade de morros influencia no escoamento do vento em formas 2D. O estudo foi realizado, em túnel de vento de camada limite, e foram modelados dois tipos de morros: um liso, que é a referência, e outro com rugosidade superficial. Os morros tinham forma cosseno quadrática e inclinação de, aproximadamente, 32° , com altura de 40 mm e distância horizontal entre o pé do morro até o cume do morro de 100 mm. A rugosidade no entorno do morro foi implementada no modelo, através de pequenos blocos cúbicos de 5 mm e com densidade de rugosidade de 4,1%. Foram realizadas quatro combinações de ensaios: morro liso com escoamento sem rugosidade, morro liso com escoamento rugoso, morro rugoso com escoamento sem rugosidade e, o último modelo, morro rugoso com escoamento rugoso. A figura 11 esquematiza o modelo com morro de superfície rugosa e escoamento rugoso sendo ensaiado em túnel de vento.

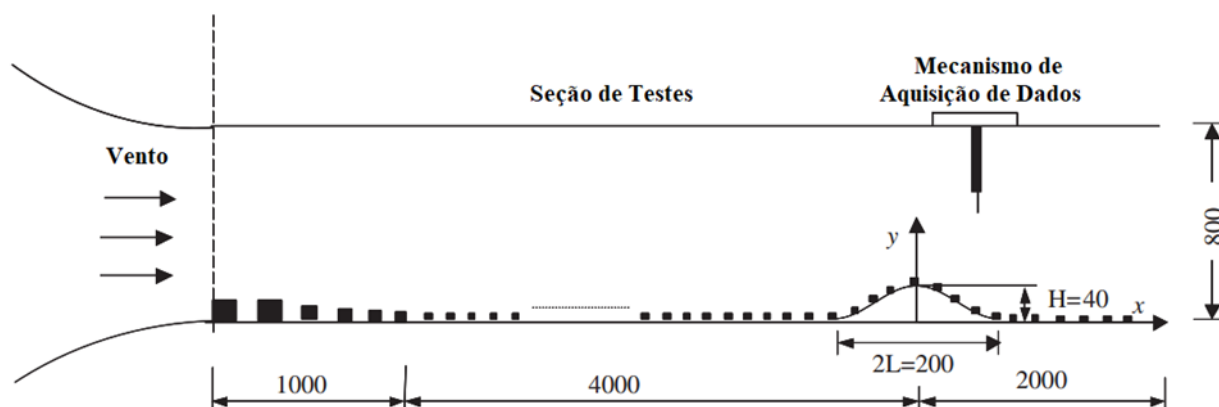


Figura 11 – Estudo de Cao e Tamura (2006): representação esquemática das características de ensaio para um morro rugoso (fonte: adaptado de CAO; TAMURA, 2006)

Cao e Tamura (2006), para investigar a estrutura do escoamento nos morros utilizaram sondas *Split-fiber*, que mediram a velocidade e a turbulência do escoamento do vento. No sopé do morro a barlavento, há uma desaceleração do escoamento e, em seguida, o escoamento acelera

até o cume, onde acontecem as máximas velocidades. Já a sotavento do morro, o escoamento é completamente diferente. Nessa região, é observado o fenômeno de separação do escoamento e as velocidades são reduzidas próximo à superfície do morro. Os resultados mostraram que tanto a rugosidade do terreno a barlavento quanto a rugosidade do morro influenciam no perfil de velocidades. Morros com rugosidade apresentam maiores velocidades que morros sem rugosidade superficial. Além disso, a região de separação do escoamento em morros rugosos entende-se mais a sotavento que em morros sem rugosidade, o que resulta em um comprimento maior para a reestruturação do escoamento. A relação entre as variáveis estudadas apresenta as seguintes características, para uma altura de $0,25H$: $S_{\text{escoamento rugoso, morro não-rugoso}} (0,918) > S_{\text{escoamento rugoso, morro rugoso}} (0,875) > S_{\text{escoamento não-rugoso, morro não-rugoso}} (0,457) > S_{\text{escoamento não-rugoso, morro rugoso}} (0,245)$.

Cao e Tamura (2007) apresentaram um novo estudo de rugosidade em morros, cujo objetivo era complementar os estudos de Cao e Tamura (2006). Neste estudo os morros tinham como característica uma altura de 40 mm e distância horizontal entre o pé do morro até o cume do morro de 150 mm, com inclinação máxima de $11,8^\circ$. A rugosidade foi implementada a barlavento do modelo, através de pequenos blocos cúbicos de 5 mm e com densidade de rugosidade de 4,1%. Foram realizadas quatro combinações de ensaios: morro liso com escoamento sem rugosidade (figura 12a), morro rugoso com escoamento rugoso (figura 12b), morro rugoso com escoamento sem rugosidade (figura 12c) e morro liso com escoamento rugoso (figura 12d). Diferentemente dos resultados obtidos no estudo publicado em 2006, os autores observaram que não há o fenômeno de separação e reestruturação do escoamento para morros com a inclinação de $11,8^\circ$, considerados morros baixos. A turbulência é diretamente influenciada pelas condições da superfície do morro.

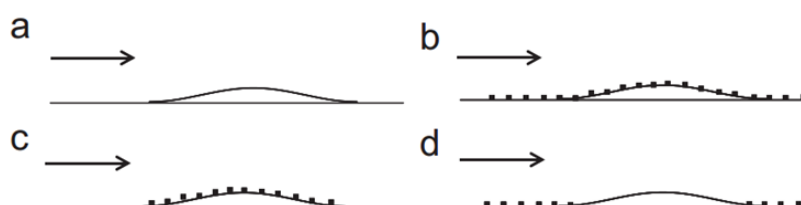


Figura 12 – Estudo de Cao e Tamura (2007): Representação esquemática dos morros estudados (fonte: CAO; TAMURA, 2007)

Para o *speed-up*, ou incremento de velocidade, é observado que existe influência tanto da rugosidade da superfície quanto da rugosidade do terreno a barlavento, similar ao que foi apresentado pelo estudo anterior. A barlavento do morro até o cume, os autores observaram a

seguinte relação para a razão de *speed-up*: $S_{\text{escoamento rugoso, morro não-rugoso}} > S_{\text{escoamento rugoso, morro rugoso}} > S_{\text{escoamento não-rugoso, morro não-rugoso}} > S_{\text{escoamento não-rugoso, morro rugoso}}$. Esses resultados são coerentes aos dos estudos anteriormente apresentados. Para a região a sotavento, a relação observada é: $S_{\text{escoamento rugoso, morro não-rugoso}} > S_{\text{escoamento não-rugoso, morro não-rugoso}} > S_{\text{escoamento rugoso, morro rugoso}} > S_{\text{escoamento não-rugoso, morro rugoso}}$. A rugosidade, além de influenciar no *speed-up*, é observada influência na turbulência. A relação entre os valores, para a região a sotavento, é a seguinte: $\sigma/\sigma_0 \text{ escoamento não-rugoso, morro rugoso} > \sigma/\sigma_0 \text{ escoamento rugoso, morro rugoso} > \sigma/\sigma_0 \text{ escoamento não-rugoso, morro não-rugoso} > \sigma/\sigma_0 \text{ escoamento rugoso, morro não-rugoso}$ (CAO; TAMURA, 2007).

No final da década de 80, foi introduzido o conceito de “razão de aspecto”, que é a razão entre a metade do comprimento e a altura do morro, conforme o croqui apresentado na figura 13. No estudo, Arya et al. (1987) foi utilizado este método de caracterização dos morros. Os pesquisadores analisaram morros 2D e rasos, cujas formas estudadas foram triangular, polinomial e uma forma que chamaram de Russa, que é uma seção transversal muito parecida com a forma sinusoidal. Os morros possuíam altura H de 110 mm e as razões de aspecto estudadas foram: 1, 3, 5, 6 e 8. As máximas inclinações para os morros com razão de aspecto 3, 5 e 8 são 26° , 16° e 10° , respectivamente. Porém, não foram modelados morros combinando todas essas formas e razões de aspecto estudadas. Foram propostas as seguintes combinações de forma e razão de aspecto: triangular-1, Russa-3, 5, 8 e Polinomial-6. O objetivo principal do estudo era verificar o comportamento da dispersão de poluentes, entretanto foram, também, analisadas características do escoamento como o perfil de velocidades e a turbulência do escoamento.

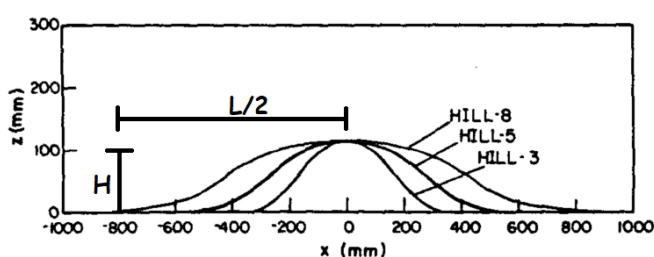


Figura 13 – Representação esquemática da razão de aspecto $(L/2)/H$ para os estudos de Arya et al. (1987) (fonte: adaptado de ARYA et al., 1987)

Nas análises dos perfis de velocidades deste estudo, os autores observaram, que, com o aumento da razão de aspecto, o *speed-up* no cume do morro diminuía, com exceção do morro triangular. Os autores explicam que pode haver uma razão de aspecto ideal, ou seja, uma inclinação ótima que tenha como resposta um perfil de velocidades máximos. Além disso, há uma relação entre a velocidade incremental e a razão de aspecto, sendo esta inversamente proporcional. A figura

14 apresenta os perfis de velocidades e como se desenvolvem ao transpor o morro. O fator de *speed-up* máximo varia entre 1,3 e 1,8, para os modelos estudados este fator é, aproximadamente, 1,8 (Russa, 3), 1,6 (Russa, 5) e 1,3 (Russa, 8) (ARYA et al., 1987).

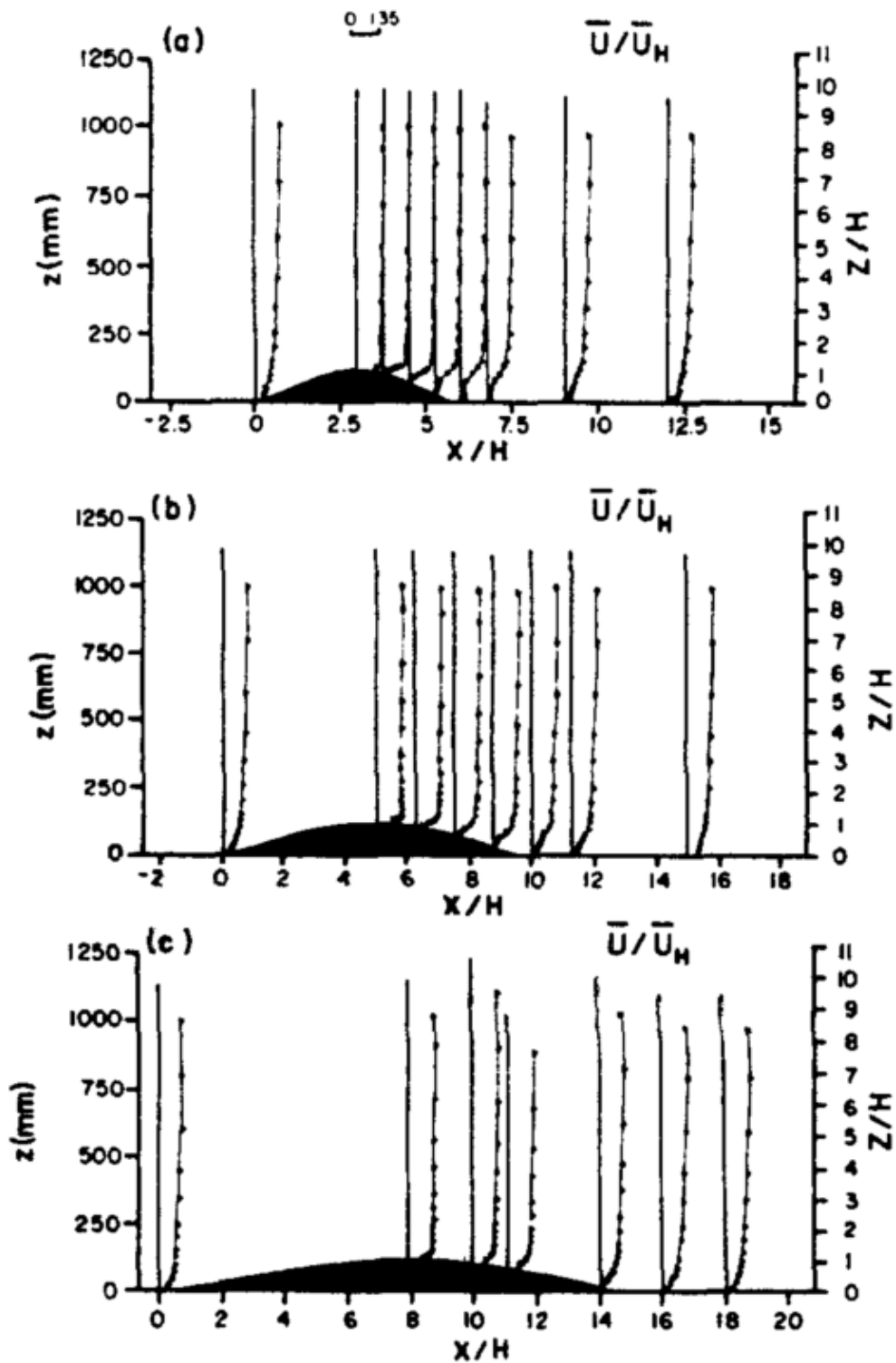


Figura 14 – Estudos de Arya et al. (1987): perfis de velocidades normalizados para os modelos com razão de aspecto 3 (a), 5 (b) e 8 (c) (fonte: adaptado de ARYA et al., 1987)

Na região a sotavento, houve uma desaceleração no escoamento, diminuindo as velocidades e aumentando a turbulência na esteira. Dentre os modelos estudados apenas o de razão de aspecto 3 apresenta separação do escoamento e esteira a sotavento do morro, o que não ocorreu quando a razão de aspecto era igual a 8. Na razão de aspecto intermediária, igual a 5, os autores afirmaram não estar sendo induzida a separação de escoamento, porém existem significativas reduções na velocidade do escoamento. (ARYA et al., 1987).

O comportamento do escoamento em terrenos irregulares é complexo e difícil de ser calculado analiticamente, visto que grande parte das formulações analíticas são para morros isolados. Nem mesmo as simulações numéricas, até hoje, conseguem resolver o problema de forma acurada. Assim, em muitos casos as alternativas que mais se aproximam da realidade são as aquisições em campo ou simulações em túnel de vento. Os pesquisadores Kim et al. (1997) fizeram um estudo sobre o escoamento de vento em morros isolados e morros múltiplos 2D. Os estudos foram realizados em túnel de vento e, posteriormente, comparados com as simulações numéricas. As figuras 15 e 16 apresentam os perfis de velocidade de morro isolado e de morros múltiplos. A forma do morro é cosseno e os morros foram analisados em duas alturas H (40 e 70 mm) com as inclinações 0,3 e 0,5. Considerando que S3 corresponde à inclinação 0,3 e, S5, à inclinação 0,5; H4 corresponde à altura de 40 mm e, H7, à altura de 70 mm, as combinações para morros isolados ensaiados foram: S3H4 (figura 13), S3H7, S5H4 e S5H7. Os morros múltiplos são compostos por dois morros em sequência cuja combinação foram: S3H4-S3H7 (figura 14), S3H7-S3H4, S5H4-S5H7 e S5H7-S5H4. Uma das observações apontada pelos pesquisadores foi em relação aos perfis de velocidades dos modelos S3H4 e S5H4: ocorre a separação do escoamento no modelo com inclinação de 0,5 (S5H4) e isso não é registrado quando a inclinação foi de 0,3(S3H4). Nas comparações entre os modelos S3H4 e S3H7 (figura 16), localizados nessa sequência, observa-se que, no topo do morro S3H7, não há mudança significativa no perfil de velocidades quando comparado com o seu respectivo morro isolado. Entretanto, o morro que o antecede, tem seu perfil de velocidades reduzidas cerca de 5% a 10%. Para as combinações dos morros múltiplos S5H4-S5H7 e S5H7-S5H4, todos apresentaram separação do escoamento, fazendo com que haja influência nos perfis de velocidades do primeiro para o segundo morro. Por exemplo, na combinação S5H4-S5H7, o segundo morro apresentou um decréscimo de 20% nas velocidades a sotavento do morro S5H7, valores comparados com o morro isolado (KIM et al., 1997).

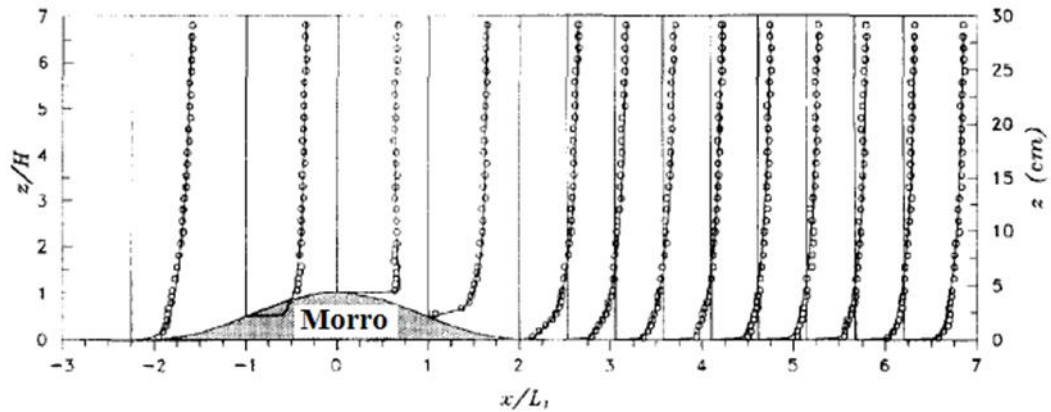


Figura 15 – Estudo de Kim et al. (1997): perfis de velocidades para o morro isolado S3H4 (fonte: adaptado de KIM et al., 1997)

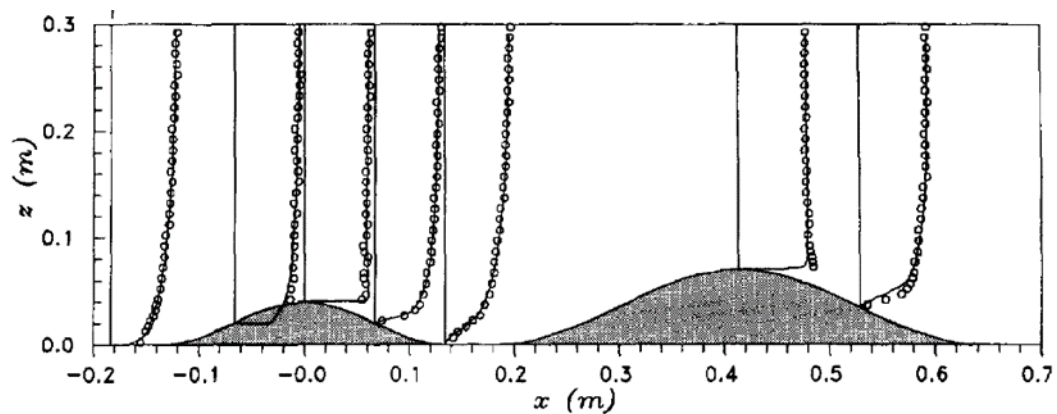


Figura 16 – Estudo de Kim et al. (1997): perfis de velocidades para morros múltiplos com combinação S3H4-S3H7 (fonte: adaptado de KIM et al., 1997)

A configuração de morros múltiplos também foi abordada pelos pesquisadores Carpenter e Locke (1999). A pesquisa realizou uma investigação experimental, em túnel de vento de camada limite atmosférica, sendo os modelos analisados 2D de forma sinusoidal, com escala de 1:1000. As medições de velocidade média foram realizadas em uma variedade de geometrias de morros que incluiu: baixo, íngreme, múltiplos e irregular, conforme figura 17. Os morros apresentavam 200 mm de altura, o ângulo referente ao morro íngreme foi de, aproximadamente, 26° e, para baixo, de 14° . Nesta pesquisa, a maior razão de bloqueio entre os morros analisados foi de 16% e os pesquisadores não utilizaram nenhum método de correção. Para não corrigir o efeito de bloqueio, os autores embasaram-se nos estudos de Glanville e Kwok (1997), nos quais as razões de bloqueio de até 25% apresentam os mesmos perfis de velocidade do vento dos casos em que não havia bloqueio.

Dentre as observações apresentadas, está a indicação de que o incremento de velocidades no cume do morro ocorre tanto para os morros baixos quanto para os morros íngremes. Para os morros múltiplos, relatam que a separação do escoamento do primeiro morro influencia diretamente no escoamento do morro subsequente. As análises do segundo morro mostram que, em decorrência de ter um morro à frente, o escoamento no cume do morro tem velocidades bastante reduzidas e alta turbulência. Esse fenômeno que acontece nesse segundo morro, reduz a separação do escoamento e, no terceiro morro, se observa que as velocidades voltam a aumentar e, a turbulência, a diminuir. Os resultados obtidos revelam que para morros sinusoidais baixos e isolados as velocidades eram mais altas em comparação com as outras geometrias analisadas, considerando uma altura de medida entre 10 e 100 m (alturas de interesse para aplicações de energia eólica). Entretanto, para dois morros sinusoidais íngremes múltiplos, observou-se um maior fator de amplificação de velocidade média, cujo valor é 2,43, a uma altura de 3 m a barlavento do cume (CARPENTER; LOCKE, 1999).

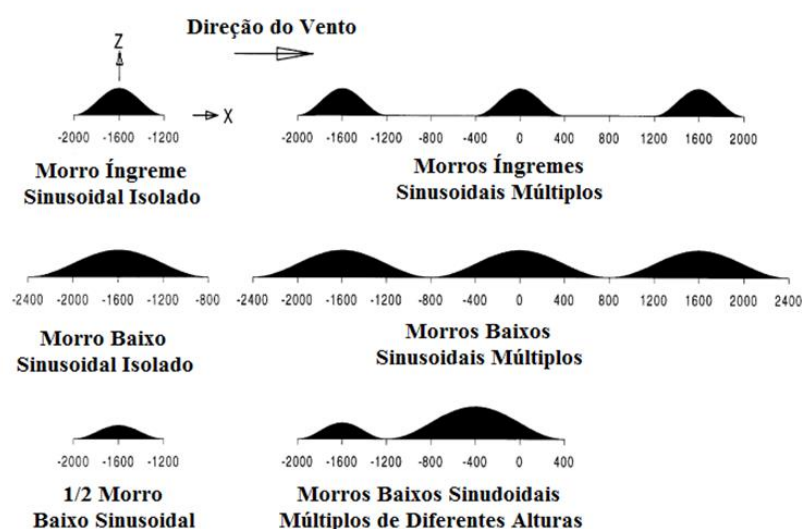


Figura 17 – Estudo de Carpenter e Locke (1999): morros sinusoidais e morros múltiplos (fonte: adaptado de CARPENTER; LOCKE, 1999)

Neste mesmo estudo de Carpenter e Locke (1999), os pesquisadores estudaram um morro irregular no qual havia pequenos patamares. Estes patamares foram colocados no talude a barlavento e ensaiados apenas para o morro baixo. Os patamares foram ensaiados individualmente, mas, na figura 18 são visualizados juntos. São caracterizados a seguir, considerando, como citado antes, sempre a barlavento do cume:

- a) 20 m de altura do patamar, localizado a 400 m;
- b) 20 m de altura do patamar, localizado a 200 m;

- c) 10 m de altura do patamar, localizado a 200 m;
- d) 5 m de altura do patamar, localizado a 200 m;
- e) 5 m de altura do patamar, localizado a 100 m;

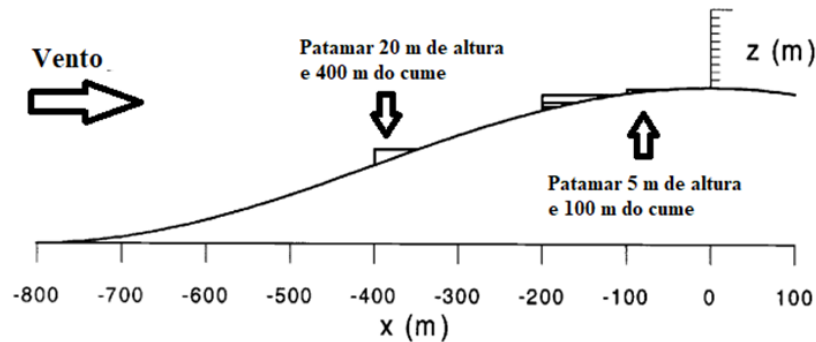


Figura 18 – Estudo de Carpenter e Locke (1999): morro sinusoidal baixo com patamares intermediários, apresentados em conjunto na figura, mas ensaiados individualmente (fonte: adaptado de CARPENTER; LOCKE, 1999)

Neste estudo com patamares intermediários, os autores observaram que o escoamento é influenciado tanto pela altura do patamar quanto pela localização em relação ao cume do morro. O patamar que mais influenciou o perfil de velocidades, no cume do morro, foi o de 20 m de altura e a 200 m de distância do cume. Em alturas de até 10 m, as velocidades reduziram pela metade e, a turbulência aumentou 150%. Quando a distância mudou para os 400 m do cume, o efeito causado pela presença do patamar não foi tão evidente. Para analisar a influência da altura do patamar, foram comparadas três alturas (5, 10 e 20 m) e estando sempre localizado a 200 m de distância do cume. Conforme a altura do patamar aumentava, houve registro de redução nas velocidades e, a turbulência, aumentou. Os autores salientam que pequenas irregularidades como o patamar de 5 m de altura e a 100 m de distância também é capaz de influenciar no escoamento do vento (CARPENTER; LOCKE, 1999).

As comparações entre simulações experimentais, em túnel de vento, e dados obtidos em campo, tornaram-se grandes aliadas na implementação de abordagens analíticas e numéricas para resolução de problemas em terrenos complexos. Lemelin, Surry e Davenport (1988), contando com um vasto banco de dados, propuseram um método simplificado capaz de avaliar as velocidades de vento, chamado de abordagem LSD. Este método é proposto para um

escoamento neutramente estratificado³ para morros ou taludes, 2D ou 3D, e para uma direção principal de vento. O método proposto abrange morros ou taludes com formas regulares inserido em regiões complexas. Entretanto, as irregularidades no entorno devem ser ínfimas em comparação com o morro ou talude analisado para que não haja separação do escoamento, pois o método não considera este efeito. No geral, os autores salientam que o método é bastante eficaz, porém, para terrenos muito complexos, se deve ter cautela, pois, mesmo com um banco de dados vasto, existem incertezas em um método simplificado.

As principais normas internacionais avaliam o efeito da topografia apenas em morros isolados, fazendo com que o carregamento do vento nas estruturas seja bastante simplificado. Como já mencionado, é importante verificar em quais condições o objeto em estudo está inserido, visto que, a rugosidade e morros a barlavento, podem causar modificações no perfil de velocidades. Em consoante, Miller e Davenport (1998) realizaram um estudo de terreno complexo com doze modelos 2D idênticos, de forma sinusoidal, com altura 96,5 mm, dois tipos de cobertura (rugosa e não-rugosa) e morros múltiplos (distância entre os cumes de 610 mm). Além desses modelos, os pesquisadores estudaram um terreno complexo, com morros irregulares e diferentes entre si. Na figura 19, observam-se os perfis de velocidades para os três primeiros morros da sequência analisada: no primeiro cume, há um incremento de velocidades evidente, no terceiro, o perfil de velocidades é muito parecido com o perfil de velocidades sem a presença de topografia, indicado pela linha tracejada, que pode ser definido como o perfil de velocidades do escoamento livre. Neste estudo, os pesquisadores analisaram a turbulência e, para esta mesma sequência de morros, a turbulência, no primeiro cume, se assemelha ao do escoamento livre e aumenta até chegar no terceiro cume analisado. Como conclusão do estudo, foi observado que os incrementos de velocidade, em terrenos complexos, são inferiores quando comparados com os resultados no cume de morros isolados. Quando comparados os resultados experimentais com os das normas britânica (BS-6399, 1995) e canadense (NRCC, 1995), notou-se que os resultados apresentados pelas normas estavam superestimando os incrementos de velocidades, apresentando um certo conservadorismo para os valores de projeto.

³ Escoamento neutramente estratificado: refere-se à estabilidade da camada limite atmosférica. Segundo Blessman (2013), quando a massa de ar subir em condições adiabáticas (não há troca de energia térmica), há uma expansão e consequente diminuição da temperatura. Se o ar circundante sofrer uma diminuição de temperatura e for igual ao do ar ascendente, define-se como estabilidade neutra.

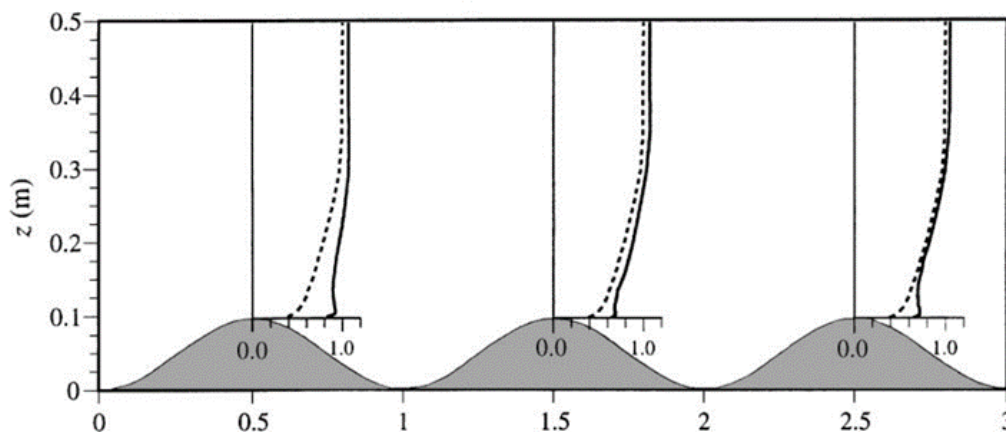


Figura 19 – Estudo de Miller e Davenport (1998): perfil de velocidades para morros sinusoidais consecutivos, sendo, a linha pontilhada o perfil para o escoamento livre e, a linha cheia, o perfil no cume (fonte: MILLER, DAVENPORT 1998)

Em estudos mais recentes sobre morros e os efeitos no perfil de velocidades do vento, os pesquisadores Pirooz e Flay (2018) analisaram os dados de morros projetados numericamente, ensaiados em túnel de vento e, analiticamente, aplicando algumas normas internacionais. Qualitativamente os morros são sinusoidais 2D, entretanto projetaram em 3D numericamente, com altura de $h = 100$ mm e inclinações de 0,30, 0,45 e 0,60. Neste estudo, as inclinações são definidas como a razão entre a altura h e o dobro da distância até a meia altura, definido como L_u . Os pesquisadores observaram que os resultados numéricos, em comparação com os experimentais, apresentaram o máximo *speed-up* entre uma faixa imediatamente antes do topo do morro, mais precisamente de $-1 < x/h < 0$, onde x é a distância horizontal do cume até o ponto em análise e h é a altura total do morro. Nas simulações numéricas os autores observaram que o maior incremento de *speed-up* acontece para a maior inclinação, e diminui conforme diminui a inclinação. Os ensaios experimentais, em túnel de vento, foram comparados com as normas canadense NBC (2015), australiana e neozelandesa AS-NZS 1170.2 (2011), americana ASCE-7 (2016), e a britânica BS (2010). A análise comparativa entre experimentos e códigos normativos mostra, neste estudo específico, que há uma tendência das normas em superestimar o perfil de velocidades, exceto pela norma americana. Nas análises comparativas entre modelos 2D e 3D, observou-se que o *speed-up* é, consideravelmente, menor para os modelos 3D em relação aos modelos 2D. Segundo os autores, isto se deve ao fato do comportamento do escoamento do vento em morros 3D, que possuem uma região de esteira menor e interferem menos nas linhas de correntes.

Pirooz e Flay (2018), analisaram a influência da inclinação na região da esteira para modelo 2D, nos pontos de separação e recolamento do escoamento. Na figura 20 são apresentados os

resultados numéricos para as três inclinações analisadas, além da comparação com as normas Canadense NBC (NBCC, 2015) e britânica BS-EN (BS, 2005; 2010). Os resultados apresentados na figura 20 mostram que quanto maior a inclinação maior é a região da esteira, conseqüentemente, mais distante será o ponto de deslocamento com o ponto de recolamento do escoamento, para modelos 2D. Os mesmos modelos foram estudados em três dimensões, e em relação aos modelos bidimensionais houve uma diminuição na região da esteira, incluindo os pontos de descolamento e recolamento do escoamento.

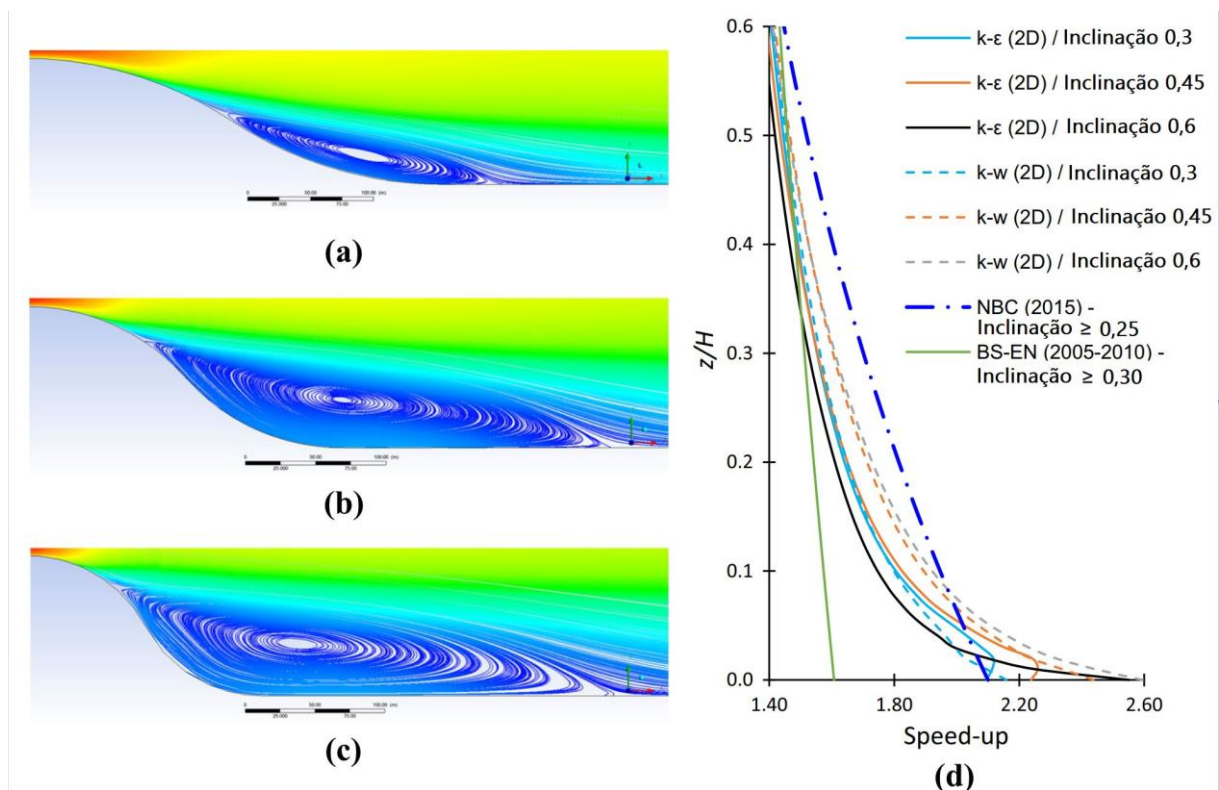


Figura 20 – Análise da região da esteira, pontos de separação e recolamento do escoamento para as inclinações 0,3 (a), 0,45 (b) e 0,60 (c), speed-up no cume do morro (d) (fonte: adaptado de PIROOZ; FLAY, 2018).

Seguindo as análises, os pesquisadores estudaram três diferentes seções transversais para morros 2D com inclinação igual a 0,45, aproximadamente, 24° (figura 21). Numericamente, os resultados mostram que a seção transversal padrão, CFD standard, apresenta os maiores incrementos de velocidades. O menor incremento de velocidade é observado no caso 3 que representa uma forma com um patamar no cume do morro. Foram realizados estudos para modelos 3D e se comparado com os modelos 2D observaram-se que o menor *speed-up* é observado em modelos 3D, considerando as mesmas características.

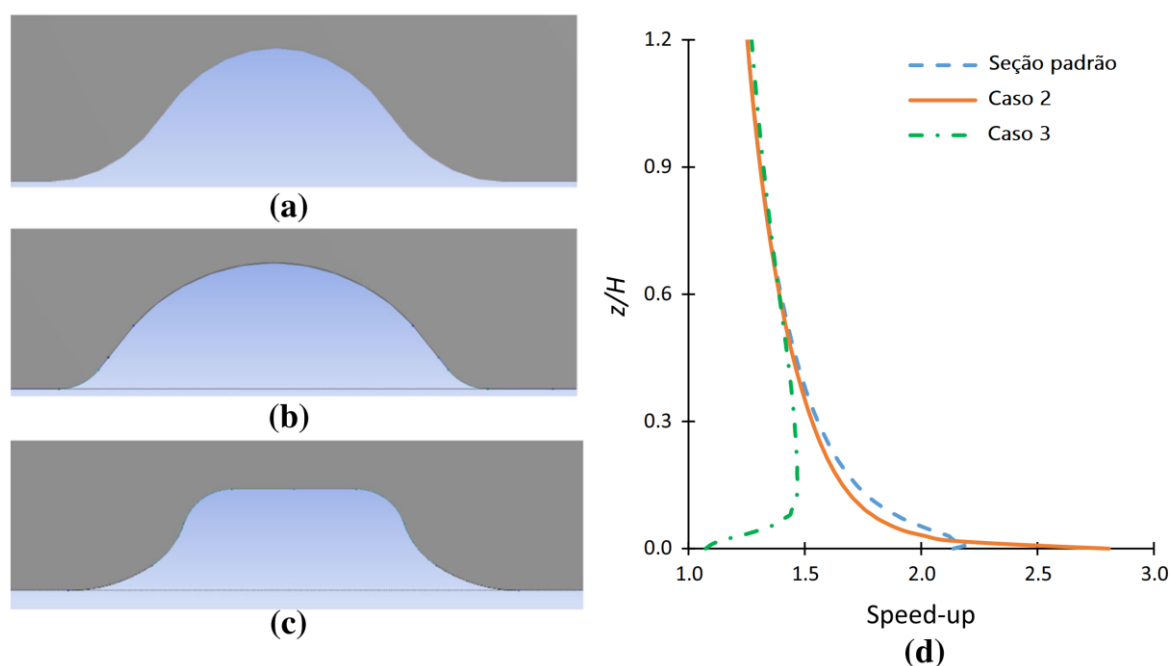


Figura 21 – Seções transversais utilizadas para as análises numéricas CFD: seção padrão (a), caso 2 (b) e caso 3 (c) (fonte: adaptado de PIROOZ; FLAY, 2018).

Muitos estudos, que consideram o efeito da topografia no perfil de velocidades, têm como objetivo principal analisar o quão benéfico, em termos de produção de energia eólica, é locar uma turbina no topo de morros. Com este fim, Tian, Ozbay e Hu (2018) estudaram qual era o ganho de potência pela turbina eólica quando locada em cumes dos morros. Os morros analisados são 2D e, sua forma, é dada por curva Gaussiana, que se assemelha muito com a sinusoidal. Foi considerada, para ambos os morros estudados, altura de 285 mm e variaram as inclinações: 0,25 e 0,5, morro com inclinação suave e morro íngreme, respectivamente. A inclinação é a razão entre a metade da altura pela distância horizontal do cume até meia altura do morro. Em relação aos perfis de velocidades médias, estes foram medidos em cinco posições a partir do cume, ou seja, $-6D$, $-3D$, 0 , $3D$ e $6D$, onde $D = 285$ mm que é o diâmetro do rotor. Os resultados obtidos, para o morro com inclinação de 0,25, mostram que há uma diferença significativa para o perfil de velocidades no cume do morro e, neste caso, não há separação de escoamento. Já para o morro com inclinação de 0,5, ocorre o maior *speed-up*, porém ocorre o fenômeno de separação do escoamento. No âmbito de produção de energia eólica, os autores concluíram que, para os casos estudados, há um ganho de potência quando a turbina está locada no cume do morro. Outro ponto a se destacar é a locação entre as turbinas eólicas. Neste caso, o ponto analisado $6D$, a barlavento do morro, apresentou uma redução nas velocidades médias de 4,4% e 2,6% para morro com inclinação suave e íngreme, respectivamente.

2.2.4.2 Estudos de modelos 3D

O escoamento em um morro 3D é diferente de um 2D, visto que, a dimensão transversal ao escoamento, é relativamente pequena em comparação com o 2D. Desta forma, para uma mesma seção de escoamento, morros 2D barram toda a seção transversal até uma dada altura, enquanto os 3D permitem escoamento livre em pontos próximos à superfície. Assim, não há concentração de linhas de corrente em toda a seção transversal ao escoamento, dessa forma o escoamento é menos perturbado. Nos estudos de Mattuella (2012), a pesquisadora comparou morros 2D com 3D e observou que, os perfis de velocidades apresentam velocidades menores para morros 3D, tanto para vento com expoente da lei de potência igual a 0,11 como para 0,23. Isto se deve ao fato do morro 3D não perturbar tanto o escoamento como o 2D.

Os estudos, em modelos 3D, intensificaram-se na década de 1970, principalmente, com estudos de campo em morros isolados. Os pesquisadores Mason e Sykes (1979) estudaram o morro *Brent Knoll*, na Inglaterra, que é um morro baixo isolado 3D e assimétrico, sua superfície é lisa, ou seja, sem rugosidades. Outras características deste morro: está localizado em uma superfície plana e não há elevações próximas, sendo assim, é considerado como um morro quase ideal. Este estudo teve *a priori* a análise 3D de morro com inclinação suave isolado e assimétrico com base analítica nos estudos dos pesquisadores Jackson e Hunt (1975). Para este estudo, os autores Mason e Sykes (1979) estenderam o modelo 2D de Jackson e Hunt (1975) para o modelo 3D. As previsões do modelo analítico resultaram em um fator de incremento de velocidades igual a 2, no cume do morro, enquanto, as medições em campo, em 2,3. Isto torna os resultados analíticos aceitáveis. Entretanto, subestima o verdadeiro valor máximo encontrado nos ensaios de campo.

A reprodução de modelos reduzidos, em túnel de vento, de morros reais é uma das formas, talvez a mais acurada, de entender o comportamento do escoamento do vento. Entretanto, para o êxito dos dados é importante que o modelo reduzido contemple não só a geometria do morro, mas também suas características de rugosidade e do seu entorno. Menorey (1980) realizou um estudo de campo e ensaios experimentais, em túnel de vento, na região de *Rakaia River Gorge*, na Nova Zelândia. Para este estudo de caso, o autor obteve uma boa correlação entre os ensaios experimentais e os dados obtidos em campo. Isso, portanto, destaca a capacidade de reproduzir, através do modelo reduzido, aqueles com dados de campo.

Além de Meroney (1980), outros pesquisadores modelaram morros reais em túnel de vento. São exemplos:

- a) *Black Mountain*, Estados Unidos (BRADLEY, 1980);
- b) *Rocky Mountains*, Estados Unidos (TEUNISSEN, 1983);
- c) *South Wales*, País de Gales (MASON; KING, 1984);
- d) *Rietholzbach*, Suíça (KUSTAS; BRUTSAERT, 1986);
- e) *Kettles Hill*, Canadá (TAYLOR; MASON; BRADLEY, 1987);
- f) *Askervein*, Escócia (TAYLOR; TEUNISSEN, 1987);
- g) *Kettles Hill*, Canadá (SALMON et al., 1988).

Estas pesquisas foram analisadas tridimensionalmente com morros de inclinação suave e moderadamente inclinados, muitas delas confirmam o estudo analítico feito por Jackson e Hunt (1975), além de colaborar para a evolução dos estudos nesta área de pesquisa.

Teunissen (1983) continuou nesta linha de pesquisa e analisou um morro 3D localizado no sopé de montanhas rochosas no oeste do Canadá. Seu estudo contemplou ensaios, em túnel de vento, obtenção de dados em campo e, além disso, desenvolveu a modelagem matemática como forma de aprimorar os conhecimentos nesta área de pesquisa. Uma das principais considerações que o autor aponta é a capacidade do túnel de vento em reproduzir pequenas variações no escoamento em vários pontos do terreno, mesmo com tantos erros inerentes as próprias medições. Em geral, o túnel de vento tem uma boa correlação com os dados de campo, entretanto, vários estudos comparativos entre ensaios de campo e em túnel de vento mostram que os dados obtidos em laboratório tendem a apresentar valores superestimados em relação aos 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. Porém, afirma estes resultados já eram esperados, visto que já tinham sido observados, anteriormente, em outros estudos.

Na mesma linha de pesquisa de Teunissen (1983), Hertig (1988) modelou, em túnel de vento, uma região dos Alpes Suíços, para observar a variação do perfil de velocidades. O autor, além de ensaiar o modelo reduzido, fez estudos de campo, nessa região, para posterior comparação. Em suas considerações, o pesquisador demonstra que as condições de contorno são essenciais para a modelagem em túnel de vento. Para tanto, na sua pesquisa, mostrou-se necessário o prolongamento da topografia a barlavento para que fossem obtidos resultados mais acurados do perfil de velocidades. 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. Outra consideração importante deste autor é que em uma topografia muito complexa não é

possível estabelecer equações paramétricas que reproduzam, com fidelidade, o perfil de velocidades e a turbulência.

Miller (1996), em sua tese de doutorado, analisou o comportamento do escoamento de camada limite turbulenta em terrenos complexos e morros sinusoidais bidimensionais. Os morros sinusoidais considerados tinham como característica uma altura de 96,5 mm e inclinação máxima de 0,5. Quanto à superfície do modelo foram considerados dois modelos: rugoso e liso. O experimento, em túnel de vento, foi realizado com doze morros em sequência, com distância entre os cumes de 609,6 mm. Além das análises dos resultados do túnel de vento, essas foram realizadas pelo método numérico. No estudo experimental, foram realizadas medições de velocidade horizontal do vento e das tensões de Reynolds. Segundo o autor, a comparação entre as medições experimentais do *speed-up* e as previsões do modelo numérico mostra que tem uma boa correlação entre si. Comparando-se o comportamento das velocidades nos cumes do morro, o pesquisador observou que o primeiro cume apresenta o maior incremento de velocidades e as velocidades diminuíram nos cumes subsequentes de forma gradativa.

Com diversos estudos de campo já realizados, as pesquisas direcionaram-se para os modelos 3D idealizados. Arya e Gadiyaram (1986) analisaram morros em forma de cone, ou seja, são morros 3D com inclinação constante. Os morros têm ângulos de 26,5° e 17,5° com inclinações de 0,5 e 0,3, respectivamente. O objetivo principal desta pesquisa era analisar a dispersão de poluentes, mas os pesquisadores também analisaram os perfis de velocidades. As duas inclinações estudadas geraram um incremento de velocidades no cume do morro, sendo que o morro com inclinação de 0,3 apresentou um maior incremento quando comparado com o morro mais íngreme.

No estudo de Ishirara et al. (1999), os autores analisaram o escoamento em um modelo reduzido de um morro 3D. A inclinação máxima é de 32°, altura de 40 mm e seção transversal cosseno quadrática. Uma das mais importantes observações do estudo é que a velocidade incremental não ocorre apenas no cume do morro, mas, também, nos pontos adjacentes ao cume a barlavento, mais precisamente a meia altura. Além disso, os pesquisadores observaram que, a sotavento do morro, há o fenômeno da separação do escoamento e este é recolado no pé do morro. As máximas perturbações no perfil de velocidades vertical foram observadas quando a relação $z/h=1$.

Nesta mesma linha de pesquisa de evolução de medições, no estudo dos pesquisadores Rasouli et al. (2009) foi utilizado um instrumento de medição capaz de capturar dados com maior precisão. O dispositivo é denominado 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 horizontal quanto verticalmente. Os pesquisadores Rasouli et al. (2009), utilizando este dispositivo, realizaram ensaios, em túnel de vento, de modelos reduzidos de um terreno complexo com escala 1:3000. Os modelos reduzidos investigados são: um vale, um cume e um morro 3D. Os resultados obtidos mostraram que, enquanto para os vales e morros, o escoamento é, relativamente, bem correlacionado, no cume este é, fortemente, influenciado pela topografia. As medições de velocidade média obtidas pelo PIV, quando comparadas com as sondas de Fio Quente, apresentam uma boa correlação para os casos analisados. Na região de recirculação, o perfil de intensidade de turbulência foi bastante adequado, já, para a região do cume, não há uma consistência entre os dois dispositivos analisados. Segundo os autores, isso se deve ao fato da complexidade do escoamento na região e, também, às limitações inerentes aos dispositivos.

No início dos anos 2000, Derickson e Peterka (2004) avaliaram o comportamento do escoamento de vento em terrenos complexos extremos. O objetivo do trabalho era desenvolver uma ferramenta híbrida para avaliar o comportamento do vento em terrenos complexos. Com o intuito de otimizar a locação de aerogeradores neste tipo de superfície e obter um maior ganho de potência, os pesquisadores uniram o modelo numérico multiescala com ensaios em túnel de vento de camada limite. O túnel de vento tinha como função servir de guia para o refinamento de dados, calibração e validação do modelo numérico. O estudo foi dividido em duas categorias: a primeira categoria contempla um estudo de caso de um terreno complexo, com declividades de até 50°, chamado *Lantau Island* em Hong Kong. A segunda, contempla taludes íngremes e penhascos 2D com inclinações de 30°, 60° e 90°. Como conclusão, os autores observaram que na presença de um morro, o escoamento é separado dentro de uma faixa, esse fenômeno pode acontecer em diversos pontos próximos ao cume, tanto a barlavento quanto a sotavento. Além disso, os autores enfatizam que a maneira como esse fenômeno ocorre depende 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 característica do escoamento turbulento normalmente. Como cada local possui orografia e escoamento de vento distintos não é possível implementar uma generalização para terrenos complexos, sendo necessário o estudo particular de cada caso. Entretanto, salientam que a união de ensaios

experimentais, em túnel de vento, e o modelo numérico é essencial para se tenha um resultado mais preciso.

No que tange a estabilidade atmosférica, Takahashi et al. (2005) estudaram o escoamento turbulento para três tipos de estabilidade atmosférica: estável, instável e neutra. Estes escoamentos foram estudados separadamente em morros 3D com forma de cosseno, de altura igual a 200 mm e base de 840 mm. Para as medições de velocidade, foi utilizado o anemômetro 3D *Laser Doppler*. Como resultados, em relação às velocidades médias, os valores encontrados no cume do morro foram iguais a 1,31, 1,26 e 1,31 para o escoamento, estável, neutro e instável, respectivamente. Em consoante aos dados obtidos, os autores observaram que a velocidade média do vento não apresenta uma significativa variação frente as diferentes estabilidades de escoamento estudadas.

As normas vigentes, embora tenham como base muitos estudos, são muito simplificadas quando aplicadas a terrenos complexos e, em muitos casos, a utilização destas não é recomendada. Muitas normas são aplicáveis apenas a morros isolados e com forma bem definida. Assim, muitos profissionais acabam, erroneamente, simplificando o morro e a sua vizinhança, obtendo um resultado que não condiz com a realidade e negligenciando o carregamento de vento.

Grande parte dos estudos desenvolvidos na área de terrenos complexos compara apenas os resultados de uma norma com os obtidos pelo estudo experimental ou de campo. Normalmente, a norma que é utilizada para comparação é a vigente no país onde está localizado o morro em estudo. Buscando conhecer o comportamento do perfil de velocidades e os parâmetros utilizados nas formulações analíticas, Ngo e Letchford (2008) realizaram um estudo comparativo entre as normas: americana ASCE / SEI 7-05, australiana-neozelandesa AS / NZS 1.170,2: 2002, japonesa AIJ: 2004 e o Eurocode CEN TC 250: 2002. O intuito da pesquisa era analisar a combinação terreno/altura e o multiplicador topográfico e, além disso, entender como cada norma insere esses parâmetros nas formulações. As análises comparativas, entre as normas, mostraram que a americana ASCE/SEI 7-05 é bem detalhada quanto a determinação da topografia, entretanto os resultados obtidos mostram uma inconsistência. A norma australiana/neozelandesa AS / NZS 1.170,2: 2002 é consistente em relação às variáveis topográficas e à influência delas no perfil de velocidades, considerando o efeito topográfico para morros baixos com uma inclinação de 5%. Entretanto, para diferentes topografias como morros e taludes, esta norma não apresenta uma diferença significativa. A norma europeia CEN TC 250: 2002, tem uma análise muito parecida com a AS / NZS 1.170:2, e fornece perfis de

vento consistentes. 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%.

Ngo e Letchford (2008), em referência ao estudo da comparação de normas, salientam que a norma japonesa tanto para seu limite inferior quanto para o superior, 13,2% e 173,2 %, respectivamente, apresenta os maiores limites de inclinação entre as normas comparadas. Além disso, dentre estas normas, é a única que prevê decréscimo na velocidade do vento na região da esteira e a que apresenta um perfil de velocidades adequado ao comportamento real desta região. Como conclusão do estudo, os autores salientam que há significativas diferenças entre os perfis de velocidades apresentados pelas quatro normativas. Segundo os autores, essas diferenças podem ocorrer por alguns motivos, dentre os quais, os limites inferiores e superiores das inclinações e os tipos de topografia: morros, encostas ou taludes.

Resultados mais recentes comprovam a necessidade de aprofundamento no estudo de terrenos complexos. Seguindo na mesma linha de pesquisa, Mattuella (2012) analisou o comportamento da camada limite atmosférica em terrenos complexos. No estudo, a autora considerou a estrutura da camada limite, bem como, separação do escoamento em um terreno complexo e em morros 2D e 3D. Foram realizados ensaios experimentais, em túnel de vento, de morros isolados, totalizando nove modelos: quatro 2D simétricos e quatro 3D simétricos e, tanto os 2D quanto os 3D, com inclinações de 25°, 32°, 52° e 68°. O nono modelo era assimétrico. A análise dos dados obtidos foi comparada por dois métodos analíticos: Jackson e Hunt (1975) e Lemelin, Surry e Davenport (1988). Além disso, a autora compara com os resultados dos seguintes métodos de previsão:

- a) norma brasileira – Cargas de Vento em Edificações: NBR 6123:1988;
- b) *European Standard* – EUROCODE 1 *Actions on Structures*: CEN TC 250: 2005;
- c) *Australian/New Zeland Standard: Minimum Design Loads on Structures* – AZ/NZS 1170.2: 2002;
- d) *Architectural Institute of Japan*, AIJ: 2004;
- e) *American Society of Civil Engineering Standard*: ASCE 7-05: 2005, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*;
- f) *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. Além disso, as normas

citadas, em geral, superestimam os incrementos de velocidade no cume do morro quando comparado com o resultado do modelo experimental. Quanto ao estudo do morro assimétrico, foram realizadas medições em vários pontos da superfície, que contemplam pontos a barlavento, cume e sotavento do morro. Nesta análise do morro assimétrico, com um ângulo de 26, 38°, observa-se que a barlavento a uma redução das velocidades até, aproximadamente, metade da altura do morro e um acréscimo até o cume do morro onde são verificadas as maiores velocidades e o efeito *speed-up*. Nos pontos a sotavento do morro, é observado a formação da esteira, onde há uma diminuição considerável das velocidades e alta turbulência. Este fenômeno pode ser até o sopé do morro a sotavento.

No trabalho de Scotton (2016), foram estudados morros sinusoidais com características semelhantes às estudadas por Mattuella (2012). Nesse caso, a autora analisou morros 2D e 3D sinusoidais, em ambas as situações com inclinações de 13°, 20°, 35° e 45° e, além disso, um morro assimétrico com e sem prolongamento da vizinhança a barlavento. A análise dos dados obtidos foi comparada a dois métodos analíticos: o proposto por Jackson e Hunt (1975) e outro, por Lemelin, Surry e Davenport (1988), sendo, esse último, conhecido como modelo analítico LSD. Além disso, a autora compara os achados com os resultados dos seguintes métodos normativos de previsão:

- a) norma brasileira – Cargas de Vento em Edificações: NBR 6123:1988;
- b) *European Standard* – EUROCODE 1 *Actions on Structures*: CEN TC 250: 2010;
- c) *Australian/New Zeland Standard: Minimum Design Loads on Structures* – AZ/NZS 1170.2: 2011;
- d) *Architectural Institute of Japan, AIJ*: 2004;
- e) *American Society of Civil Engineering Standard: ASCE 7-10: 2010, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*;
- f) *National Building Code of Canada* – NRCC: 2010.

Scotton (2016) observou que no cume dos morros são observados os maiores incrementos de velocidades. Em relação ao incremento de velocidades, no cume, calculado analiticamente pelas normas supracitadas, observa-se que elas tendem a superestimar as velocidades. Fato que corrobora com os estudos de Mattuella (2012). Além da análise dos fenômenos no cume, a autora estudou um ponto a barlavento e outro a sotavento, ambos localizados a meia altura do morro. Os resultados obtidos, para o ponto a barlavento, mostram que, para as quatro inclinações, houve uma diminuição de velocidades nessa posição. Aplicando as normas para esse ponto, pode-se perceber valores superestimados para os incrementos de velocidades e, para

os relativos ao cume, valores diferentes dos obtidos em túnel de vento. Para o ponto a sotavento, em todos casos analisados, aconteceu o efeito de descolamento do escoamento na região da esteira, causando uma queda brusca nas velocidades e um aumento na turbulência. Para este ponto, apenas a norma japonesa apresentou um perfil de velocidades com o efeito citado: as demais definiram perfis como se estivesse acontecendo um incremento das velocidades. No morro assimétrico estudado por Scotton (2016), em que foi analisada a influência do prolongamento da vizinhança a barlavento, a autora observou que não havia uma diferença significativa no perfil de velocidades para o ponto localizado no cume. Entretanto, como o terreno era complexo, seria mais adequado modelar de forma mais discretizada, pois assim, se teria, com maior acurácia, a verificação da influência desses vizinhos no morro analisado.

A linha de pesquisa que aborda a análise do escoamento em terrenos complexos, com o passar do tempo, vem se tornando cada vez mais consistente através do aprimoramento das pesquisas desenvolvidas por meio de medições em campo, métodos numéricos ou ensaios experimentais em túnel de vento. Unindo estas ferramentas, é possível aprimorar e aprofundar o conhecimento na área com bastante exatidão. Muitas vezes, para tornar a avaliação mais precisa é necessário a obtenção de dados através de dois ou mais métodos. Isto sugere que é imprescindível o trabalho conjunto desses métodos para a 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 mais bem desenvolvidos e estudados.

2.2.5 Estudos de parâmetros fundamentais

Neste capítulo, são abordados os parâmetros fundamentais para o desenvolvimento experimental deste estudo. São eles: efeito da escala do escoamento de camada limite, formação da região de recirculação, recolamento e número de Reynolds.

Os efeitos da escala para um escoamento de camada limite atmosférica, em túnel de vento em uma região suburbana, são importantes para análise do escoamento. Kozmar (2011), estudou o efeito de diferentes escalas da velocidade média, intensidade de turbulência e tensões de cisalhamento para número de Reynolds turbulento. Em seu estudo, as análises foram realizadas utilizando três escalas distintas: 1:220, 1:250 e 1:400. Os resultados experimentais mostraram ser possível reproduzir o escoamento urbano, em túnel de vento, para diferentes escalas sem perder a qualidade da simulação das características físicas do escoamento. Porém, a

dependência da escala de comprimento integral na velocidade do vento de referência e o aumento linear integral com a altura, que são observadas na escala real, não puderem ser visualizadas em escala reduzida. Segundo o autor, os valores de comprimento de escala recomendados pelas normas são díspares, por exemplo na ESDU⁴ 85020 de 1985 os valores são significativamente maiores que em outras normas internacionais. O túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, localizado na UFRGS, foi utilizado no presente estudo e tem escala de 1:400 para o escoamento de camada limite atmosférica.

Quando um modelo reduzido é ensaiado, em túnel de vento, além das condições de semelhança do modelo e do escoamento, é importante observar se os fenômenos observados no campo podem ser coerentemente reproduzidos em escala reduzida. Um exemplo disto é a separação do escoamento, que acontece quando o escoamento encontra um obstáculo, sendo que este pode ser um morro, talude ou qualquer outro elemento que cause mudança no escoamento. A figura 22 exemplifica o fenômeno de separação do escoamento. Os pontos em que há essa mudança do escoamento são chamados de pontos de separação. A região de recirculação é aquela na qual o escoamento forma pequenos turbilhões e a sua dimensão é caracterizada por um número de Reynolds entre 1400 e 19000, sendo dependente da altura do objeto e velocidade do escoamento livre. Segundo Leclercq et al. (2001), a separação é consequência da ocorrência do gradiente de pressão adversa que promove o bloqueio a pouca distância do objeto. Considerando-se “h” a altura do objeto imerso no escoamento, a separação acontece a uma distância horizontal de, aproximadamente, $1h$ a $1,2h$ a barlavento. E, sendo “d” a altura do morro, o recolamento ocorre em, aproximadamente, $0,6d$ acima do topo do morro (LECLERCQ et al., 2001). Já para os autores Sherry, Jacono e Sheridan (2010), o comprimento de recolamento tem a tendência de aumentar conforme o aumento do número de Reynolds e, no trabalho destes autores, os comprimentos obtidos ficaram entre $1,9h$ e $4h$, diferente dos resultados apresentados por Leclercq et al. (2001). Os resultados do estudo mostraram dois regimes distintos: os que possuem o número de Reynolds abaixo de 8500 e, os acima de 8500. No primeiro grupo, o recolamento é altamente dependente do número de Reynolds e, no segundo, o número de Reynolds não tem grande relevância para o fenômeno.

⁴ ESDU: Engineering Sciences Data Unit

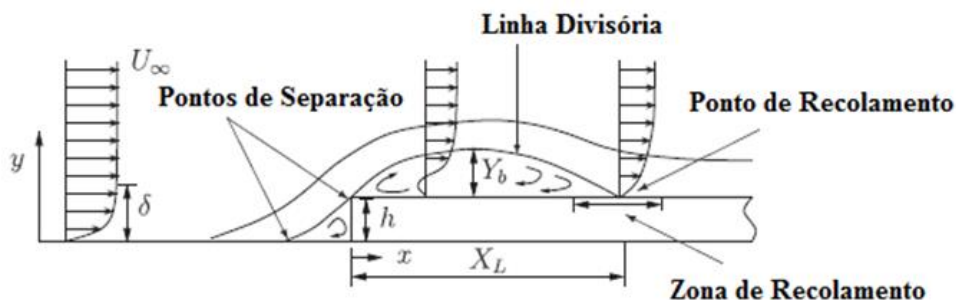


Figura 22 – Esquemática dos pontos de separação e recolamento do escoamento quando esse encontra um obstáculo (fonte: adaptada de SHERRY; JACONO; SHERIDAN, 2010).

No estudo experimental de McAuliffe e Larose (2012), foi analisada a influência do número de Reynolds e as características físicas do escoamento em terrenos complexos. A pesquisa desenvolveu-se em um parque eólico em construção e, para verificar-se as condições do empreendimento, um modelo reduzido com escala igual a 1:1500 foi ensaiado em túnel de vento. Além desses ensaios, mastros foram instalados no local do parque para a comparação com os dados experimentais. As análises mostraram que a maioria das velocidades, nos mastros, para ventos principais, tem maior valor nos dados obtidos no campo do que aqueles dos ensaios experimentais. Mas, as intensidades de turbulências medidas nos mastros apresentaram valores menores nos dados obtidos em campo em relação aos dos ensaios experimentais. Segundo os pesquisadores, essa discrepância entre os resultados comparativos entre dados de campo e experimentais, se deve ao fato de não ter sido introduzida a vegetação na rugosidade do terreno.

3 MODELOS ANALÍTICOS PARA EFEITO TOPOGRÁFICOS

Neste capítulo são descritos modelos analíticos e códigos normativos. Para este estudo são detalhadas as formulações para o perfil de velocidades do vento com influência do efeito topográfico. O cálculo da influência da topografia na velocidade do vento será descrito para as seguintes normativas e modelos analíticos:

- a) norma brasileira: NBR 6123 (ABNT, 1988);
- b) Norma Americana: *American Society of Civil Engineering Standard* – ASCE 7-10 (ASCE, 2010);
- c) norma australiana e neo-zelandesa: AS/NZS 1170.2 (AS/NZS, 2011);
- d) norma canadense: *National Building Code of Canada* – NBCC (NBCC, 2010);
- e) norma Europeia: EUROCODE 1: *Actions on Structures* – CEN TC 250 (CEN, 2010);
- f) norma japonesa: *Architetural Institute of Japan* – AIJ (AIJ, 2004).

3.1 MODELOS ANALÍTICOS E NORMAS TÉCNICAS: INTRODUÇÃO

O cálculo com grande precisão e acurácia do incremento da velocidade, ou *speed-up*, no perfil de velocidades, influenciado por topografias é um assunto bastante desafiador e complexo. Por mais que, com o passar dos anos, mais e mais estudos foram desenvolvidos e aprimoraram o conhecimento, se tem uma dificuldade de formular uma expressão analítica, nas normativas, que se adeque a orografias complexas. Sabe-se que, grande parte das orografias encontradas na natureza são muito complexas e que, em uma mesma região, podem ser encontrados, por exemplo, morros, vales e taludes. Diversos estudos têm como prerrogativa desenvolver uma nova formulação, mas torna-se um trabalho difícil, já que cada topografia apresenta uma condição bem peculiar. Entretanto, há algumas formulações, bem embasadas, principalmente para pontos nos quais o comportamento do escoamento é conhecido, que tendem a responder de forma bastante adequada e coerente. É imprescindível, que, para um modelo gerar resultados próximos à realidade, se observe, minuciosamente, os parâmetros que interferem no escoamento. Para tanto, uma base de dados consolidada é essencial para a aferição do modelo.

Dentre os fatores que influenciam o escoamento do vento, a sazonalidade diária e das estações do ano, que mudam a temperatura da Terra, devem ser considerados ao desenvolver o cálculo do perfil de velocidades. Esta variação da temperatura diária, bem como das estações do ano,

muda todo comportamento do vento. Além disso, destes outros fatores devem ser considerados para obtenção dos resultados do escoamento: a localização dos pontos de medição e em qual período do dia está sendo realizada a análise. Ayotte, Davy e Choppin (2001) realizaram um estudo que analisa temporal e espacialmente, de forma simplificada, a velocidade e a direção do vento para torres meteorológicas. Neste estudo, os autores extrapolaram linearmente as principais variáveis do vento e a altura de coleta dos dados. Estas extrapolações foram realizadas utilizando equações linearizadas, através de modelos simplificados de escoamento, admitindo um escoamento neutramente estratificado. Ao analisar os dados obtidos, os autores observaram que, quanto maior o tempo de obtenção de dados, mais precisos são os resultados. Isto é, os resultados representaram melhor a realidade. Entretanto, raramente, longos períodos de aquisição de dados, com continuidade, são encontrados nos estudos, o que diminui a confiabilidade no modelo analítico. Mesmo que os dados sejam escassos, é importante que sejam utilizados para embasar as modelagens analítica e numérica. A comparação dos dados de campo com os resultados obtidos por modelagem, mostra se o modelo tem capacidade de representar a realidade, através de pequenas amostragens. Além de modelos lineares, como o citado anteriormente, existem os modelos não-lineares. Estes, por sua vez, tendem a ser mais custosos computacionalmente, porém representam mais fielmente a realidade. Alguns pesquisadores podem ser destacados em relação a este tipo de estudo: Xu e Taylor (1992), Wood e Maison (1993) e Xu, Ayotte e Taylor (1994).

O presente estudo tem como finalidade a análise dos parâmetros das normas, anteriormente mencionadas, tendo como base dois modelos analíticos. Estes por sua vez, são primordiais para o entendimento do comportamento das velocidades em terrenos não-planos. Além disso, o trabalho aborda as formulações analíticas propostas em normas internacionais e na norma brasileira NBR 6123. De um modo geral, tanto as normas como os modelos analíticos levam em consideração as dimensões do morro ou talude, seja pela dimensão vertical, horizontal ou ângulo. Para o cálculo do perfil de velocidades, é considerado um terreno plano, com a velocidade de referência a 10 m acima do nível do terreno. Porém, deve-se salientar, que nem todas velocidades de referência possuem o mesmo tempo de aquisição: umas, a aquisição de 3 s, outras, 10 min podendo ser, até uma média horária. 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.

3.2 NORMA BRASILEIRA: NBR-6123:1988 – FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES

A Norma brasileira para o cálculo do perfil de velocidades do vento, NBR-6123 (ABNT, 1988), determina as forças estáticas sobre uma estrutura através da velocidade característica (V_k). Por sua vez, a velocidade característica é função da velocidade básica (V_0) e de fatores que a modificam. Considera que influenciam no seu cálculo: a localização, fator topográfico (S_1), a rugosidade, as dimensões da edificação e a sua altura sobre o terreno (S_2) e o fator estatístico (S_3). Desta forma, a Norma considera que fatores S_1 , S_2 e S_3 são valores que modificam a velocidade básica (V_0) e esses podem ser maiores ou menores que um dependendo das características da estrutura e do ambiente. Através da velocidade característica (V_k), determina-se a pressão dinâmica devido ao vento na estrutura e, por consequência, determina-se a força devida ao vento.

Os morros ou taludes influenciam diretamente na velocidade do vento e, portanto, no perfil de velocidades. Isso se deve ao efeito Venturi, que atinge o valor máximo para ventos que soprem na direção perpendicular ao cume do morro, um talude ou morro de grande largura. Nesses casos, é considerado um escoamento 2D. A deflexão da velocidade, variável no plano vertical, é delimitada por uma altura de influência – h_i , cuja medida se dá a partir da base do morro ou talude e, em geral, se situa em torno de $3d$ a $4d$, onde d é altura do morro. Esta altura é influenciada pela forma e pelas dimensões do morro ou talude, bem como pelo gradiente de temperatura vertical do escoamento (BLESSMANN, 2013).

Segundo Blessmann (2013), para morros ou taludes com inclinações até 17° , o aumento da velocidade é proporcional à inclinação e é causado pelo efeito Venturi. Entretanto, para inclinações superiores a 17° , o perfil de velocidades médias permanece constante, ou seja, independe da inclinação. Isso se deve ao fato de que, no sopé do morro a barlavento, se formam vórtices, fazendo com que as linhas de corrente tenham variações imperceptíveis.

3.2.1 Velocidades básica e característica do Vento – NBR 6123:1988

A velocidade básica, segundo a NBR-6123 (ABNT, 1988), é a máxima velocidade média obtida em um intervalo de 3 s, que pode ser excedida uma vez, em média, a cada cinquenta anos. Esta medição de velocidades é obtida, na altura de 10 m acima do terreno em campo aberto e plano, e é específica para cada região do Brasil. A velocidade básica de cada região está registrada no mapa de isopleias da Norma, apresentado na figura 23, em intervalos, entre as curvas, de 5 m/s.

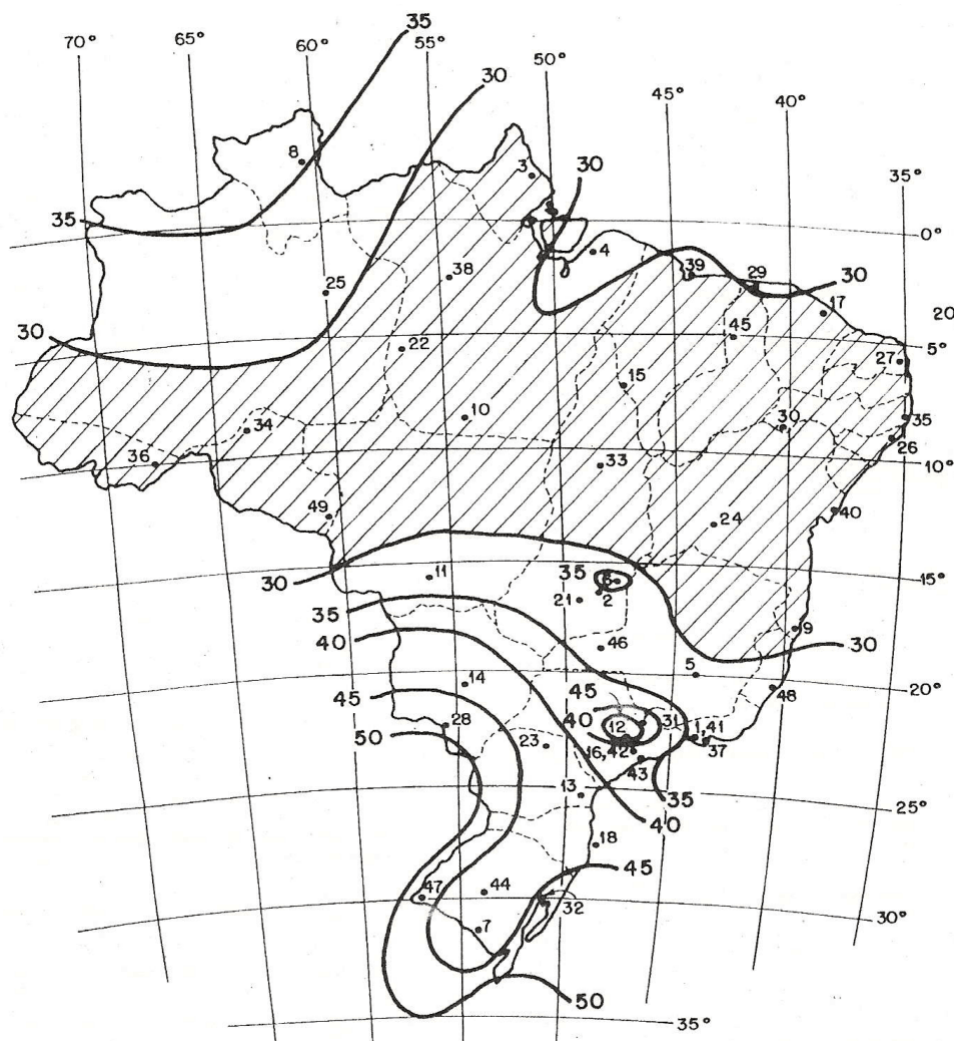


Figura 23 – Gráfico de isopletas da velocidade básica (V_0), em m/s: NBR 6123 (fonte: ABNT, 1988)

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

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

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.

3.2.2 Fator topográfico S_1 – NBR 6123:1988

O fator topográfico S_1 é responsável por ajustar a velocidade básica (V_0) em relação à topografia do terreno. Esse fator é classificado pela topografia ser: plana ou fracamente acidentada ($S_1 = 1,0$) ou ser formada por taludes ou morros. A Norma considera os terrenos como sendo alongados, de tal modo que se admite um escoamento de vento em duas dimensões (2D), soprando da esquerda para a direita. Na figura 24a, é apresentada a topografia de um talude e, na 24b, a de um morro. Nessas figuras, são assinaladas posições distintas: “A”, “B”, para taludes e morros, e “C”, exclusivamente para taludes. A posição “A”, localizada no sopé a barlavento, tanto no talude quanto no morro, apresenta um fator topográfico igual a 1. A posição “B”, que se localiza no cume do talude ou morro, é aquela na qual ocorrem os maiores incrementos de velocidade devido a presença da topografia. Para a posição “C”, no talude, o valor do fator topográfico é igual a 1, desde que seja respeitada, a partir do ponto “B”, a distância de quatro vezes a altura do talude (ABNT, 1988).

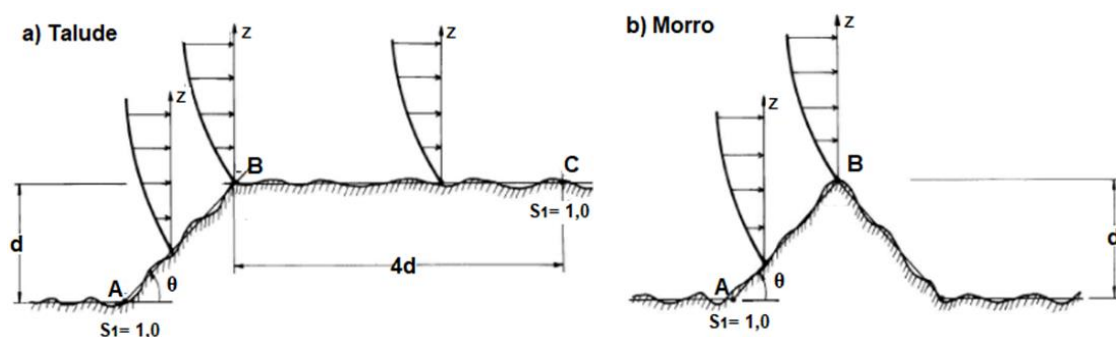


Figura 24 – Fator topográfico para taludes (a) e morros (b): NBR-613 (fonte: adaptado de ABNT, 1988)

Para a posição “B”, no cume, tanto de taludes quanto de morros, o valor de S_1 é calculado em função do ângulo do talude a barlavento. Desta forma, conhecido o ângulo, usa-se uma das equações 2, 3 ou 4. Para ângulos intermediários, é necessário interpolar, linearmente, e o valor deve ser sempre, para estes casos, maior ou igual a 1. Para vales profundos, protegidos de ventos provindos de qualquer direção, o valor de $S_1 = 0,9$ (ABNT, 1988).

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

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

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

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.

As formulações indicadas pelas equações 2 a 4 são aproximadas e aplicáveis a taludes e morros isolados. Para terrenos de maior complexidade é recomendado que sejam realizados ensaios em túnel de vento. Assim, presume-se que os modelos topográficos reduzidos, ensaiados em túnel de vento, tenham um escoamento próximo ao real.

3.2.3 Fator de rugosidade S_2 – NBR 6123:1988

O fator de rugosidade S_2 é responsável pelo ajuste da velocidade básica (V_0) em relação à rugosidade do terreno, às dimensões da edificação e à distância vertical do ponto em análise - acima do terreno. Considerando ventos turbulentos, numa camada limite estavelmente neutra, a velocidade é influenciada pela distância vertical do ponto em análise acima do terreno, ou seja, a cota Z , sendo majorada conforme se distancia do terreno. Entretanto não é infinitamente crescente e estabiliza quando não há mais a influência da superfície terrestre no escoamento. Para o cálculo do fator S_2 é necessário definir corretamente a rugosidade do terreno e as dimensões da estrutura, pois são essas características que determinam os parâmetros para a formulação. Os próximos subitens descrevem, respectivamente, a rugosidade do terreno, as dimensões das edificações, a altura sobre o terreno e, por fim, o cálculo do fator S_2 .

3.2.3.1 Rugosidade do terreno

A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias, em que, cada uma delas, considera o conjunto de elementos que a caracterizam:

- a) categoria I: superfícies lisas com grandes dimensões e mais de 5km 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;
- c) categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos (cota média do topo dos obstáculos menor ou igual a 3m). 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 (cota média do topo dos obstáculos menor ou igual a 10m), 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, sendo que, a cota média dos obstáculos, deve ser maior que 25m.

3.2.3.2 Dimensões das edificações

As dimensões das edificações são importantes para definir o intervalo de tempo a ser usado no cálculo da velocidade média. Conforme definição da NBR-6123 (ABNT, 1988, p.8):

A velocidade do vento varia continuamente, e seu valor médio pode ser calculado sobre qualquer intervalo de tempo. Foi verificado que o intervalo mais curto das medidas usuais (3 s) corresponde a rajadas cujas dimensões envolvem convenientemente obstáculos de até 20 m na direção do vento médio.

Quanto maior o intervalo de tempo utilizado, no cálculo da velocidade média, maior será a dimensão abrangida pela rajada. As dimensões características são divididas em três classes: “A”, “B” e “C”, cujos intervalos de tempo são, 3, 5 e 10 s. respectivamente. Estas classes são assim caracterizadas (ABNT, 1988, p. 9):

- 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.”.

A Norma ainda salienta que, para edificações que excedam, em sua maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal, 80 m, o intervalo de tempo correspondente será determinado pelo anexo A desta Norma.

3.2.3.3 Altura sobre o terreno

O cálculo do fator S_2 , em uma determinada altura “ z ”, além de ser influenciado pela cota é dependente de parâmetros meteorológicos “ b ”, “ p ” e “ F_r ”, abaixo identificados. Assim, o fator S_2 é obtido pela equação 5 (ABNT, 1988):

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

Onde

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

b = parâmetro meteorológico conforme categoria e classe, adimensional;

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

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

p = parâmetro meteorológico conforme categoria e classe, adimensional.

Os parâmetros meteorológicos “ b ”, “ p ” e “ F_r ” devem ser definidos pelo quadro 1, que é identificado pela NBR 6123 como tabela 1 (ABNT, 1988, p 9). Os parâmetros meteorológicos “ b ” e “ p ” são dependentes da categoria e da classe nas quais está inserida a edificação, entretanto, “ F_r ”, é considerado, invariavelmente, para a categoria II, mas variando a classe.

Quadro 1 – Fatores meteorológicos (NBR-6123)

Categoria	Zg (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
		Fr	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: adaptado de ABNT, 1988)

3.2.4 Fator estatístico S_3 NBR 6123:1988

O fator estatístico S_3 baseia-se em conceitos estatísticos e considera a vida útil da edificação e a segurança requerida para esta. A velocidade básica do vento V_0 , por definição da NBR-6123 (ABNT, 1988), considera um período de retorno médio de 50 anos, o qual apresenta uma probabilidade de 63%.

Os parâmetros de vida útil de 50 anos e a probabilidade de 63% são considerados adequados para edificações residenciais ou comerciais com alto fator de ocupação, as quais são referenciadas no grupo 2 do quadro 2. Os demais valores probabilísticos do fator estatístico S_3 são descritos no quadro 2, tabela 3 pela NBR 6123 (ABNT, 1988, p. 10).

Quadro 2 – Valores mínimos do fator S_3 (NBR-6123)

Grupo	Descrição	S_3
1	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
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

(fonte: adaptado de ABNT, 1988)

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

A norma Americana, ASCE 7-10 (ASCE, 2010) considera para efeito de carregamento nas estruturas, quatro métodos diferentes relativos às cargas devidas ao vento. O primeiro procedimento, chamado *Directional Procedure*, é para edifícios de todas as alturas. O segundo, *Envelope Procedure*, é para edifícios baixos (até 18 m de altura). O terceiro, *Directional Procedure*, é para elementos estruturais e, o último, é sobre o túnel de vento que pode ser utilizado para quaisquer estruturas. Para este estudo, não se leva em consideração nenhum tipo específico de edificação, apenas se utiliza as definições de velocidade básica, pressão de velocidades e fatores das condições de terreno. Desta forma, em referência a estes métodos, se utiliza o do método de túnel de vento. Assim como na Norma brasileira, a americana calcula a ação do vento de forma simplificada por meio 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 básica do vento, em função das categorias de risco e localização, de risco da edificação, de exposição e um fator topográfico.

3.3.1 Velocidade básica do vento – ASCE 7-10: 2010

A norma americana define, como velocidade básica do vento, aquela medida em uma rajada com intervalo de tempo de 3 s. Esta medida é obtida a 10 m acima do terreno e em uma categoria de exposição C. Esta categoria, como as B e D, são assim definidas (ASCE, 2010):

- a) B: é definida por áreas urbanas e suburbanas, áreas arborizadas, ou por terrenos com grandes obstruções e fechadas; compreende edificações com a altura média menor ou igual a 9,1 m. É aplicável quando a rugosidade da superfície, prevalece a 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 composta por terreno aberto com construções esparsas e construções com altura média inferiores a 9,1 m, esta categoria inclui também pastagens; é aplicável a todos os casos em que as categorias B e D não se aplicarem;
- c) D: considera áreas planas sem obstrução e superfície de água, este grupo inclui salinas, banhados e geleiras ininterruptas. É aplicável quando a rugosidade do terreno, prevalece a 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.

A velocidade básica do vento é diferenciada conforme o tipo de risco em que a edificação está inserida e estes são divididos em quatro grupos, em função da probabilidade de ocorrência para um período de retorno de 50 anos: I – 15%, II – 7% e III e IV – 3%.

3.3.2 Pressão de velocidades – ASCE 7-10: 2010

A pressão de velocidade “ q_z ” (equação 6) é função da cota “ z ” e depende dos fatores: topográfico, direcionalidade, do coeficiente de exposição da pressão de velocidades além da velocidade no local em análise:

$$q_z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_D \cdot V_0^2 \cdot I \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

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

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

I = fator de importância.

3.3.3 Velocidade característica – ASCE 7-10: 2010

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 (ABNT, 1988) faz-se um rearranjo da equação 6 para se obter a velocidade modificada, conforme equação 7:

$$V_K = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \text{ e } q_z = 0,613 \cdot V_K^2 \quad \text{Norma Brasileira}$$

$$q_Z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{Zt} \cdot K_D \cdot V_0^2 \cdot I = 0,613 \cdot V_k^2 \quad \text{Igualando Normas}$$

$$V_k = \sqrt{K_z \cdot K_{Zt} \cdot K_D} \cdot V_0 \quad \text{(equação 7)}$$

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

I = fator de importância.

3.3.4 Fator de exposição de pressão de velocidades – ASCE 7-10: 2010

O fator de exposição de pressão de velocidades (K_z) considera o efeito da altitude no perfil de escoamento, ou seja, para cada ponto acima do terreno a velocidade é calculada conforme a distância relativa superfície. Este fator é baseado na categoria de exposição a qual o terreno está inserido e pode ser determinado pelas equações 8 e 9: Os parâmetros de rajada, altura nominal de camada limite atmosférica e altura mínima são descritos no quadro 3.

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{Z}{Z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \rightarrow 4,6 \text{ m} \leq Z \leq Z_g \quad \text{(equação 8)}$$

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{4,6}{Z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \rightarrow Z < 4,6 \text{ m} \quad \text{(equação 9)}$$

Onde:

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

Z_g = altura nominal da camada limite atmosférica, em metros (quadro 3);

Z = altura acima do terreno, em metros;

α = expoente da lei logarítmica da velocidade de rajada, em um tempo de 3 s (quadro 3).

Quadro 3 – Parâmetros α , Z_g (ASCE 7-10)

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

(fonte: adaptado ASCE, 2010)

A altura mínima (Z_{min}) descrita pelo quadro 3, 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 Z_{min} indicada no quadro 3. Para a análise de morros, como não há edificação acima do terreno, considera-se apenas Z_{min} .

3.3.5 Fator de direcionalidade do vento – ASCE 7-10: 2010

O fator de direcionalidade do vento (K_D) é responsável pelas características da direção do vento incidente que são influenciadas pelo tipo de edificação. Como nesse estudo não será aplicado o fator de direcionalidade, o valor deste fator é considerado igual a 1 para manter a neutralidade da formulação. Segundo Simiu (2011), a ausência da consideração de um padrão da direcionalidade das velocidades do vento faz com que as pressões calculadas sejam muito conservadoras e, por esse motivo, são aplicados os fatores de direcionalidade os quais reduzem as pressões calculadas. Entretanto, quando não há informações precisas da direção do vento, é necessário utilizar um fator neutro igual a 1, evitando equívocos já que a Norma americana considera o fator de direcionalidade menor que 1 (SIMIU, 2011).

3.3.6 Fator topográfico – ASCE 7-10: 2010

O fator topográfico (K_{zt}) considera o efeito da topografia na velocidade do vento, que causa o *speed-up* ou incremento de velocidade do vento. As figuras 25a e 25b mostram as esquematizações de talude e morro, respectivamente, bem como a localização das variáveis e suas características físicas. Para incluir o efeito da mudança de topografia, é necessário que sejam atendidas as restrições, a seguir apresentadas (ASCE, 2010):

- morro isolado, talude ou cume não deve conter obstruções, a barlavento, por outra topografia semelhante, devendo ser considerada para essa análise a menor distância horizontal, considerada a partir do cume do morro, entre os valores de 3220 m e o correspondente a 100 vezes a altura da topografia característica;
- morro isolado, talude ou cume deve ser projetado acima da altura característica do terreno, a 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.

Caso estas condições não forem cumpridas, o fator topográfico deve ser $K_{zt} = 1,0$.

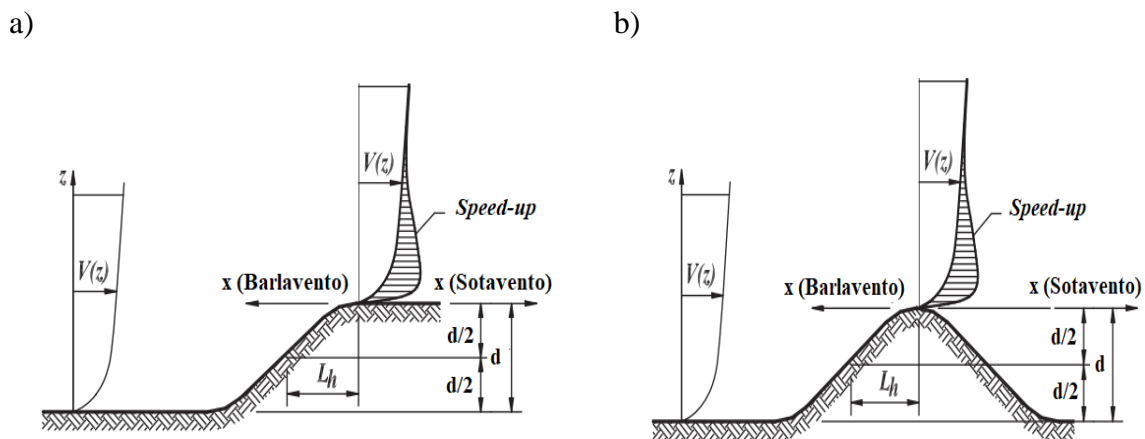


Figura 25 – Esquematização de talude (a) e morro (b) (ASCE-7-10) (fonte: adaptado ASCE, 2010)

A formulação do fator topográfico para a Norma americana ASCE/ 7-10 é descrita pela equação 10:

$$K_{Zt} = (1 + K_1 + K_2 + K_3)^2 \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

K_{Zt} = fator topográfico, adimensional;

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

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

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

Os valores do fator K_1 estão indicados no quadro 4, e os valores de K_2 e K_3 são calculados pelas equações 11 e 12. Os valores dos fatores de atenuação de altura (γ) e horizontal (μ) podem ser obtidos no quadro 4.

$$K_2 = 1 - \frac{|x|}{\mu \cdot L_h} \quad (\text{equação 11})$$

$$K_3 = e^{-\frac{\gamma z}{L_h}} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

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

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

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

μ = fator de atenuação horizontal, adimensional;

L_h = distância a barlavento, a partir da crista, até o local no qual a diferença de elevação do solo é metade da altura do morro ou talude, em metros;

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

γ = fator de atenuação de altura, em metros.

Quadro 4 – Parâmetros μ e γ (ASCE 7-10)

Parâmetros para Incremento de Velocidade para Morros e Taludes						
Morro	K ₁ /(d/L _h)			γ	μ	
	Exposição				Barlavento da crista	Sotavento da crista
	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, assim como a Norma brasileira, apresenta uma formulação simplificada para estabelecer os valores das velocidades do vento, as pressões e, por fim, calcular as ações do vento. Para verificar as forças devidas ao vento que uma edificação está submetida, é necessário o cálculo da chamada velocidade local pela AS/NZS 1170.2 (AS/NZS; 2011). Para tanto, é necessário obter a velocidade regional, 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 – AS/NZS 1170.2

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. A velocidade regional é classificada em oito direções cardinais e separada em duas regiões principais: ciclônica e não-ciclônica. Para regiões ciclônicas, C e D, as velocidades regionais são multiplicadas pelos fatores “ F_C ” e “ F_D ”, respectivamente. Estes fatores são utilizados para incluir as incertezas da previsão das velocidades de vento nas regiões ciclônicas. Os valores de F_C e F_D são dependentes de “ R ”: o inverso da probabilidade anual da velocidade do vento a ser excedida. Assim, conforme o valor de R , os valores dos fatores estão definidos. Se $R \geq 50$ anos: $F_C = 1,05$ e $F_D = 1,10$ e quando $R < 50$ anos: $F_C = F_D = 1,00$. A velocidade regional para a norma Australiana Neozelandesa é tabelada e varia de acordo com a região que a estrutura em análise está inserido.

A velocidade local ($V_{sit,\beta}$), é calculada considerando a velocidade regional do vento na região e fatores modificadores. Estes fatores correspondem à topografia da região, ao terreno/altura, à direcionalidade do vento e a proteção, conforme descreve a equação 13 (AS/NZS, 2011):

$$V_{sit,\beta} = M_D \cdot M_{z,cat} \cdot M_s \cdot M_t \cdot V_R \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

$V_{sit,\beta}$ = velocidade local, em m/s;

$M_{z,cat}$ = multiplicador do terreno/altura, adimensional;

M_t = multiplicador topográfico, adimensional;

M_D = multiplicador de direcionalidade, adimensional;

M_s = multiplicador de proteção, adimensional;

V_R = velocidade regional, adimensional.

3.4.2 Multiplicador de Terreno/Altura – AS/NZS 1170.2

O multiplicador de terreno/altura ($M_{z,cat}$) contempla a mudança de rugosidade do terreno durante à incidência de vento. Este multiplicador é dividido conforme a categoria em que o terreno está inserido (AS/NZS, 2011):

- a) categoria 1: terreno aberto com pouca ou nenhuma obstrução e superfície de água;
- b) categoria 2: superfícies aquáticas, terreno aberto, poucas e esparsas obstruções 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 complexos industriais.

Definidas as características no local onde a edificação será locada, quanto a região ser não ciclônica (A, B e W) ou ciclônica (C e D), categoria do terreno e altura Z (corresponde a altura acima do terreno, o multiplicador de terreno/altura ($M_{z,cat}$) é definido conforme quadro 5.

Quadro 5 – Multiplicador de terreno/altura para regiões A/B/W e C/D (AS/NZS 1170.2)

Multiplicador Terreno/Altura						
Altura (Z)	Regiões A, B e W				Regiões 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, nas quais existam diferentes tipos de terrenos, é necessário fazer a média ponderada entre os diferentes fatores de terreno. Neste caso, deve ser calculado o valor médio ao longo da distância média a barlavento do morro ou edificação correspondente a uma altura “Z” acima do terreno.

3.4.3 Multiplicador de direcionalidade – AS/NZS 1170.2

O multiplicador de direcionalidade para as regiões B, C e D é classificado em dois grupos. O primeiro grupo é aplicado para a “[...]determinação das forças resultantes e momentos nas edificações e ações do vento em elementos estruturais.”, e o valor a ser utilizado é $M_D = 0,95$ (AS/NZS, 2011, p.15). Para o segundo grupo, demais casos incluindo revestimentos, 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. Para este estudo usar-se-á o fator neutro igual a 1,00 para equalizar com a Norma brasileira.

3.4.4 Multiplicador de proteção – AS/NZS 1170.2

O multiplicador de proteção é calculado e, neste caso, é diferente de 1, quando é implementada uma proteção na direção do vento, a fim de mitigar os efeitos causados pela sua incidência na estrutura. Segundo a AS/NZS 1170.2 (AS/NZS, 2011), a presença de árvores não pode ser considerada como proteção e este multiplicador é apropriado apenas para uma direção particular de incidência, sendo indicado pelo quadro 6. Este quadro contempla os valores deste multiplicador, mas estes são função do parâmetro de proteção “S”, que, por sua vez, depende de l_s (espaçamento médio entre obstáculos). Os parâmetros S e l_s são calculados, respectivamente, pelas equações 14 e 15 (AS/NZS, 2011).

Quadro 6 – Multiplicador de proteção (AS/NZS 1170.2)

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

(fonte: adaptado de AS/NZS, 2011)

$$S = \frac{l_s}{\sqrt{h_s \cdot b_s}} \quad (\text{equação 14})$$

$$l_s = h \cdot \left(\frac{10}{n_s} + 5 \right) \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

S = parâmetro de proteção, adimensional;

l_s = espaçamento médio entre obstáculos, em metros;

h_s = altura média do telhado dos edifícios de proteção, em metros;

b_s = largura média dos edifícios de proteção, em metros;

h = altura média do telhado, acima do terreno, da estrutura protegida, em metros;

n_s = número de edifícios de proteção dentro de um setor de 45°, com raio de 20 vezes h , adimensional.

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. Como neste estudo não há nenhum tipo de proteção, pois se trata de um morro idealizado, este multiplicador será considerado igual a 1 para fins de comparação com as demais normas.

3.4.5 Multiplicador topográfico – AS/NZS 1170.2

O multiplicador topográfico para a Norma australiana/neozelandesa é classificado em duas categorias. A primeira, é específica para locais, na Nova Zelândia e Tasmânia, que tenham altura maior do que 500 m acima do nível do mar. Para a segunda categoria, que contempla os demais casos, é necessário utilizar o maior valor entre: $M_t = M_h$ ou $M_t = M_{lee}$.

Para a primeira categoria, este fator é calculado pela equação 16 (AS/NZS, 2011):

$$M_t = M_h \cdot M_{lee} \cdot (1 + 0,00015 \cdot E) \quad (\text{equação 16})$$

Onde:

M_h = multiplicador de forma do morro, adimensional;

M_{lee} = multiplicador do efeito de sotavento é adotado para locais na Nova Zelândia e, para outros locais, o valor adotado é 1,00, adimensional;

E = elevação média do terreno acima do nível do mar, em metros.

O fator do efeito de sotavento M_{lee} não foi identificado na Austrália, dessa forma o valor utilizado é igual a 1,0. No presente estudo, para equalizar com a Norma brasileira, utiliza-se este fator igual a 1,00 (AS/NZS, 2011). O multiplicador de forma do morro M_h pode ser considerado para cada direção cardinal a ser analisada. Deve ser considerada a seção topográfica mais adversa que ocorre dentro de um ângulo de 22,5°, para cada lado da direção cardinal em análise, e são considerados os seguintes itens (AS/NZS, 2011):

a) $d/(2L_u) < 5\%$, $M_h = 1,0$;

b) $5\% \leq d/(2L_u) \leq 45\%$ M_h é descrito pela equação 17:

$$M_h = 1 + \left(\frac{d}{3,5 \cdot (Z + L_1)} \right) \times \left(1 - \frac{|x|}{L_2} \right) \quad (\text{equação 17})$$

c) $d/(2L_u) > 45\%$, dentro da zona de separação, é descrito pela equação 18:

$$M_h = 1 + 0,71 \cdot \left(1 - \frac{|x|}{L_2} \right) \quad (\text{equação 18})$$

d) $d/(2L_u) > 45\%$, em outro lugar dentro da zona topográfica, é dada pela equação 17, da alínea b.

Onde:

d = altura do morro ou talude, em metros;

L_u = distância horizontal, a barlavento, a partir do cume do morro ou talude, até a metade da altura, em metros;

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

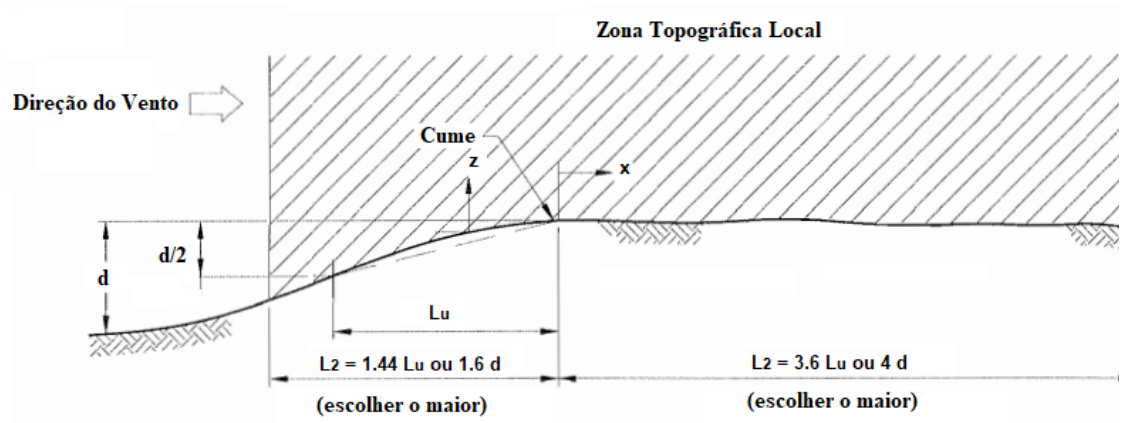
L_1 = escala horizontal para determinar a variação vertical de M_h , sendo maior que $0,36 L_u$ ou $0,4 H$, em metros;

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, em metros;

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

As figuras 26 e 27 ilustram as variáveis apresentadas nas equações 17 e 18 (AS/NZS, 2011).

a)



b)

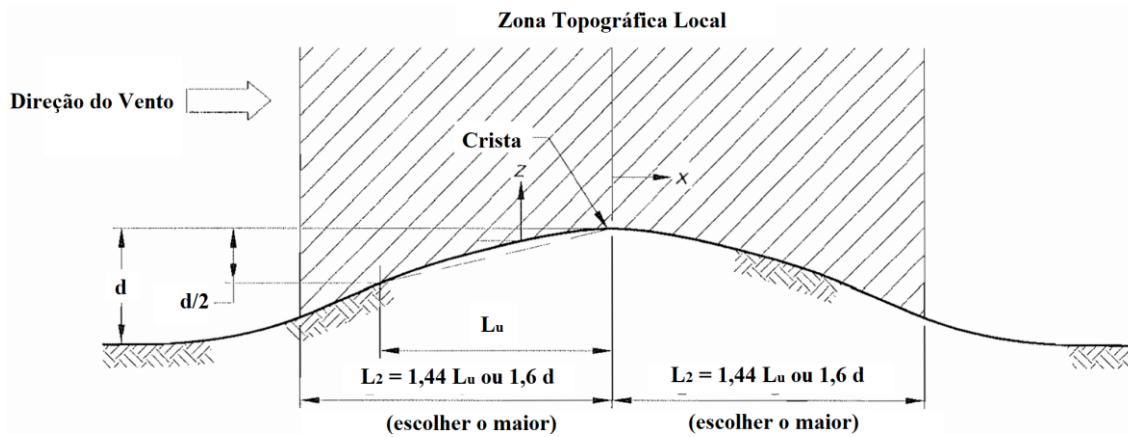


Figura 26 – Esquematização de talude (a) e morro (b) (AS/NZS 1170.2) (fonte: adaptado de AS/NZS, 2011)

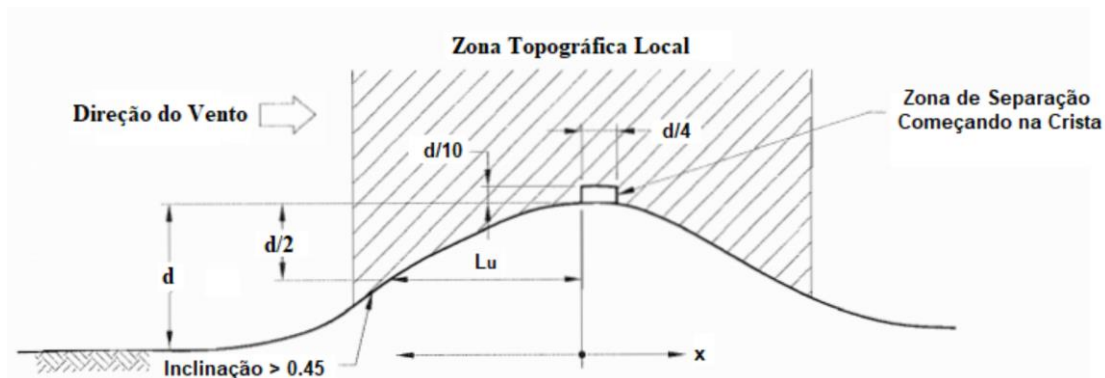


Figura 27 – Esquemática da zona de separação em cumes de morros (AS/NZS 1170.2) (fonte: adaptado de AS/NZS, 2011)

Quando a altura coincidir com a crista do morro ou talude, os valores adotados para M_h devem ser obtidos no quadro 7.

Quadro 7 – Multiplicador de forma do morro (AS/NZS 1170.2)

Inclinação Barlavento ($d/2L_u$)	Multiplicador de forma do morro (M_h)
< 0,05	1,00
0,05	1,08
0,10	1,16
0,20	1,32
0,30	1,48
$\geq 0,45$	1,71

(fonte: adaptado de AS/NZS, 2011)

3.5 NORMA CANADENSE – NBCC – NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA

O cálculo dos efeitos do vento em estruturas, pelo *National Building Code of Canada* (NBCC, 2010), é dividido em três tipos de abordagens. Na primeira, o 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 e, assim, o cálculo das ações devidas ao vento é considerado de forma estática, desconsiderando sua resposta dinâmica.

A segunda forma abordagem de cálculo é um procedimento detalhado. Este considera o efeito dinâmico nas estruturas, ou seja, vibrações induzidas pelo vento. As edificações, ao se empregar

esse método, são consideradas flexíveis. Assim, para a aplicação deste procedimento são necessários alguns parâmetros (NBCC, 2010):

- 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.

A terceira abordagem indica o ensaio em túnel de vento. Este procedimento é o mais indicado quando é necessário ter uma resposta mais acurada do comportamento do vento e deve ser utilizado, principalmente, quando as estruturas analisadas não estão estabelecidas em Norma. Entretanto, mesmo quando as estruturas são estabelecidas em Norma, estes ensaios não devem ser excluídos, se necessário, da análise. Com esta abordagem é possível determinar os coeficientes de pressão exterior nas fachadas da edificação, sendo essas fundamentais para a definição do carregamento de vento.

3.5.1 Velocidade média do vento – NBCC

A velocidade de referência do vento é definida como a média da velocidade horária, a 10 m de altura acima do nível do solo, em terreno plano e aberto, o que corresponde a exposição “A” para esta Norma. Para calcular a velocidade nas cotas acima do solo é necessário utilizar a equação 19 (NBCC, 2010):

$$V_Z = \bar{V} \cdot \sqrt{C_{eZ}} \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

V_Z = velocidade na altura em análise, em m/s;

\bar{V} = velocidade média, em m/s;

C_{eZ} = coeficiente de exposição na altura em análise, adimensional.

3.5.2 Fator de exposição – NBCC

O fator de exposição, para a Norma canadense, é baseado no perfil de velocidades médias. Assim, este fator pode variar, consideravelmente, conforme a rugosidade do terreno a barlavento da edificação. Para calcular o fator de exposição é necessário adequar o tipo de

terreno segundo o tipo de exposição: “A” ou “B”. A exposição “A” é contempla terrenos abertos com edificações ou obstruções espalhadas, mares e lagos. A exposição “B”. áreas suburbanas e urbanas, considerando centro de grandes cidades, terrenos arborizados, florestas, ou seja, terrenos rugosos. Nas equações 20 e 21 são descritos os fatores para as exposições “A” e “B” (NBCC, 2010):

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

$$C_e = 0,7 \times \left(\frac{Z}{12}\right)^{0,30}, 0,7 \leq C_e \rightarrow \text{Exposição "B"} \quad (\text{equação 21})$$

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. Caso a rugosidade seja diferente entre as regiões, o fator de exposição deve variar de acordo com o terreno.

3.5.3 Velocidade incremental do vento incidente em morros e taludes –

NBCC

As edificações, quando construídas a barlavento e no topo de morros e taludes, sofrem um acréscimo de velocidade e, maior será este valor, quanto mais próximas estiverem do cume. Esta consideração é feita para morros e taludes que tenham inclinação maior que 10%. A Norma canadense diferencia três tipos de topografias e para cada uma há um incremento máximo e um fator de redução da velocidade com a altura, conforme consta no quadro 8.

Quadro 8 – Parâmetros p^{**} e $\Delta V_{\text{máx}}$ (NBCC)

Forma do morro	$\Delta S_{\text{máx}}$	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)

Assim, para considerar os efeitos da topografia na velocidade do vento, deve-se calcular o fator topográfico, descrito pela equação 22 e a velocidade incremental pela equação 23 (NBCC, 2010):

$$C_t = \left(1 + \frac{\Delta S}{C_g}\right) (1 + \Delta S) \quad (\text{equação 22})$$

$$\Delta S = \Delta S_{\text{máx}} \left(1 - \frac{|x|}{kL} e^{-p^{**} \frac{z}{L}}\right) \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

C_t = fator topográfico para emprego em morros e taludes, adimensional;

C_g = fator de efeito de rajada, adimensional;

ΔS = velocidade incremental do vento, adimensional (quadro 8);

$\Delta S_{\text{máx}}$ = velocidade incremental máxima do vento, adimensional (quadro 8);

p^{**} = coeficiente de redução da velocidade incremental com a altura, adimensional (quadro 8);

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

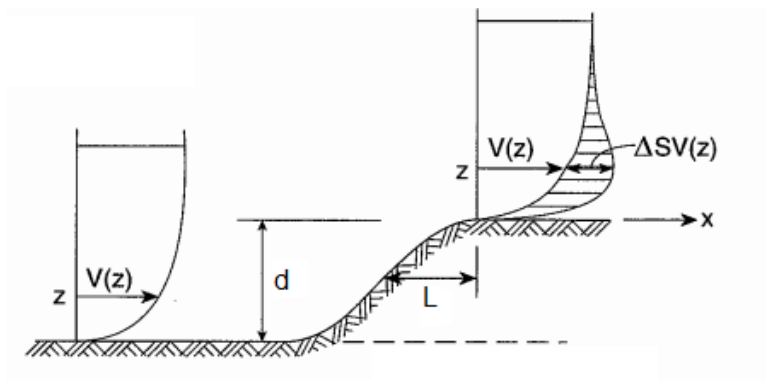
k = parâmetro de cálculo da máxima velocidade incremental do vento sobre morros, adimensional (quadro 8);

L = distância horizontal a partir do cume ao ponto a barlavento no qual a altura da elevação é $d/2$, em metros.

A figura 28 esquematiza um talude (a) e um morro (b) e os parâmetros que são utilizados para calcular o *speed-up*. Quando a razão $d/L > 0,5$, assume-se que $d/L = 0,5$ e substitui-se $2d$ por L

na equação 23. Para inclinações menores que 10% a velocidade incremental é insignificante ou não é verificada.

a)



b)

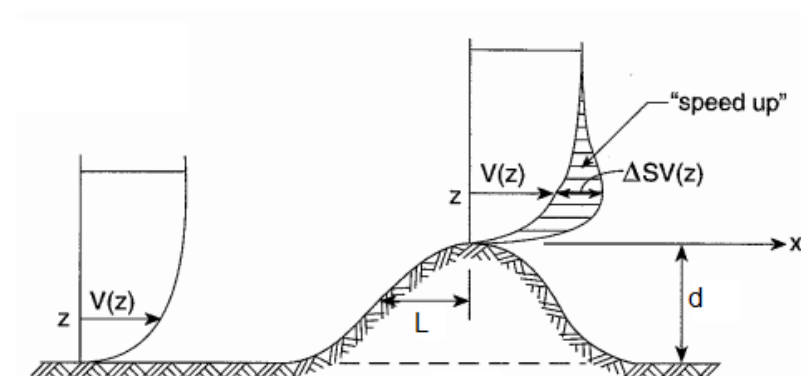


Figura 28 – Esquematização de talude (a) e morro (b) (NBCC) (fonte: adaptado de NBCC, 2010)

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

O carregamento de vento nas estruturas, segundo o Eurocode 1, é considerado por meio 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, essa Norma considera o efeito da topografia no perfil de velocidades quando a inclinação média da topografia, a barlavento, for superior a 5%. Tal declividade aplica-se para morros, taludes, penhascos e vales. Entretanto para topografia nas quais a inclinação média, a barlavento, for menor que 3% não é necessário considerar o efeito topográfico.

3.6.1 Velocidade básica do vento – EUROCODE 1

A velocidade básica do vento ($V_{b,10}$) é definida como função da velocidade básica fundamental, da direção (fator de direcionalidade C_D) e da época do ano (fator de época do ano C_s) em que é analisado. O valor da velocidade fundamental do vento básico ($V_{b,f}$) corresponde a 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, medido a 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 equação 24 (CEN, 2010):

$$V_{b,10} = V_{b,f} \cdot C_D \cdot C_s \quad (\text{equação 24})$$

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), em m/s;

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

C_D = fator de direcionalidade do vento, adimensional;

C_s = fator de época do ano, adimensional.

3.6.2 Velocidade média do vento – EUROCODE 1

A velocidade média do vento (V_m), para a Norma europeia, é definida em função da velocidade básica e dos fatores de rugosidade (C_r) e topografia (C_t) do terreno (equação 25). A velocidade média, assim como os fatores variam conforme a altura a ser analisada (CEN, 2010):

$$V_m(z) = V_{b,10} \cdot c_r(z) \cdot C_t(z) \quad (\text{equação 25})$$

Onde:

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

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

$C_r(z)$ = fator de rugosidade em função da altura, adimensional;

$C_t(z)$ = fator topográfico em função da altura, adimensional.

3.6.3 Fator de rugosidade do terreno – EUROCODE 1

O fator de rugosidade do terreno depende, também, do fator de terreno (K_r). Este é função do comprimento de rugosidade Z_0 (quadro 9) e do comprimento de rugosidade de referência (equação 25). O comprimento de rugosidade de referência considerado é o tipo de terreno classificado como II ($Z_{0,II}$), ou seja, para áreas com vegetação rasa e obstáculos isolados, também definido pelo quadro 9. A Norma europeia possui cinco categorias para tipo de terreno e, cada uma, possui seu respectivo comprimento de rugosidade e altura mínima. As categorias, comprimento de rugosidade e altura mínima são descritas no quadro 9.

Quadro 9 – Categorias de terrenos e parâmetros Z_0 e Z_{min} (EUROCODE 1)

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)

Desta forma, o fator de terreno é calculado pela equação 26 (CEN, 2010):

$$K_r = 0,19 \cdot \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (\text{equação 26})$$

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;

Conhecidos esses parâmetros, o fator de rugosidade é calculado pelas equações 27 e 28 (CEN, 2010):

$$C_r(Z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right); Z_{min} \leq Z \leq Z_g \quad (\text{equação 27})$$

$$C_r(Z) = C_r(Z_{min}); Z \leq Z_{min} \quad (\text{equação 28})$$

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.

3.6.4 Fator topográfico – EUROCODE 1

O fator topográfico é adotado quando a orografia (morros, taludes, montanhas) possui uma inclinação maior que 5%. Para terrenos, nos quais a inclinação média é menor que 5%, este fator pode ser desconsiderado sem qualquer ônus: nestas situações o fator topográfico é considerado igual a 1 (CEN, 2010). Para morros e taludes isolados, a velocidade do vento é dependente de sua declividade, a qual é definida pela razão entre altura “d” e o comprimento horizontal do sopé do morro até o cume “ L_u ” como é demonstrado pela figura 29.

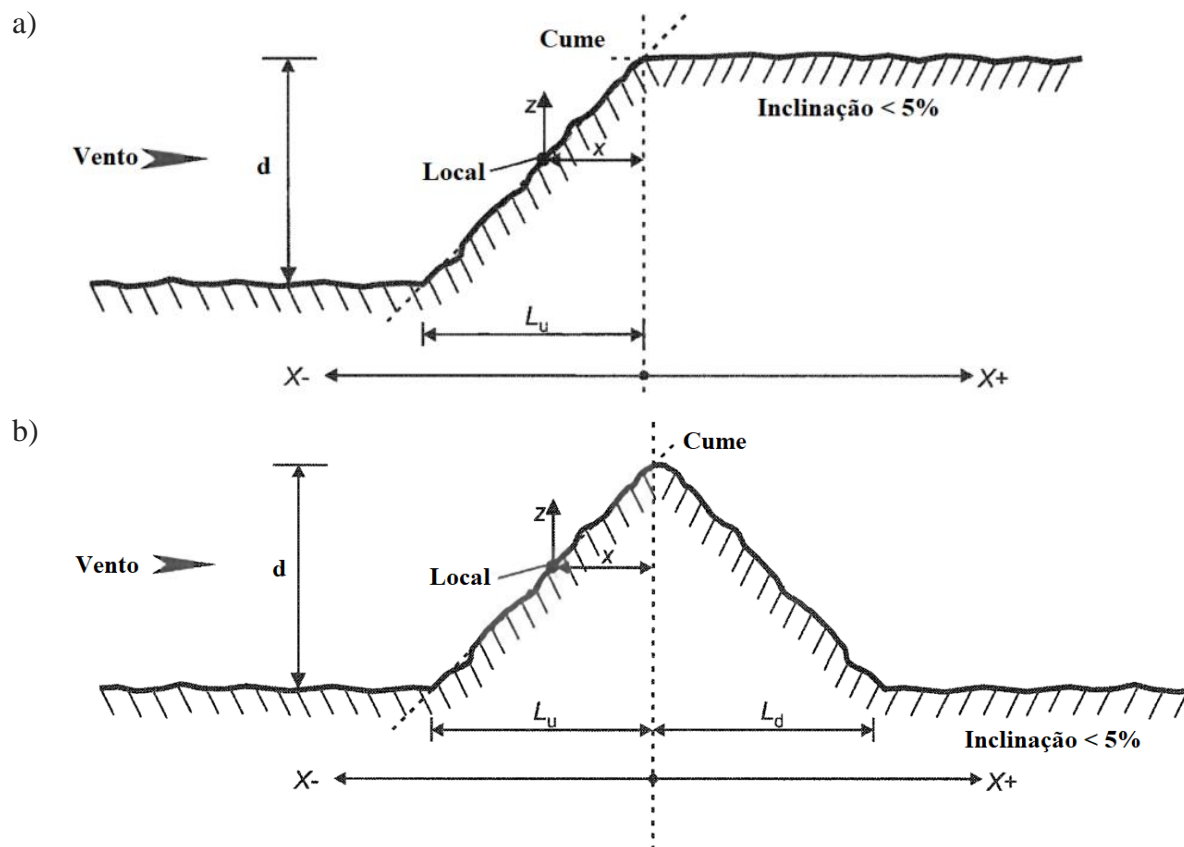


Figura 29 – Esquema levantamento de dados para cálculo da velocidade incremental de talude (a) e morro (b) (EUROCODE 1) (fonte: adaptado de CEN, 2010)

O maior incremento de velocidades do vento acontece no cume e é determinado através do fator topográfico “ C_t ”. Para descrever corretamente os efeitos da topografia, deve-se seguir as seguintes situações:

- a) morros e taludes, a barlavento, quando a declividade estiver entre 0,05 e 0,3 e o valor de $|X| \leq \frac{L_u}{2}$;
- b) morros, a sotavento,
 - quando a declividade $\theta \leq 0,3$ o valor de $|X| < \frac{L_d}{2}$;
 - quando a declividade $\theta \geq 0,3$ o valor de $|X| < 1,6d$;
- c) taludes, a sotavento,
 - quando a declividade $\theta \leq 0,3$ o valor de $|X| < 1,5 L_e$;
 - quando a declividade $\theta \geq 0,3$ o valor de $|X| < 5d$.

Ainda, para cálculo do fator topográfico, é necessário conhecer o fator de localização topográfico “ S_t ”. Este fator é função dos comprimentos horizontais do cume até o sopé do morro “ L_u ”, do cume a quaisquer pontos à direita ou à esquerda do cume “ X ” e o comprimento

horizontal efetivo “ L_e ”. 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: $\theta > 0,3$, $L_e = d/0,3$. As equações 29 a 38 descrevem o cálculo do fator de localização topográfica para cada situação apresentada (CEN, 2010):

a) Barlavento para morros e taludes:

$$S_t = A \cdot e^{\left(\frac{B \cdot X}{L_u}\right)} \rightarrow -1,5 \leq \frac{X}{L_u} \leq 0 \text{ e } 0 \leq \frac{Z}{L_e} \leq 2 \quad (\text{equação 29})$$

$$A = 0,1552 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^4 - 0,8575 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^3 + 1,8133 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 - 1,9115 \left(\frac{Z}{L_e}\right) + 1,0124 \quad (\text{equação 30})$$

$$B = 0,3542 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 - 1,0577 \left(\frac{Z}{L_e}\right) + 2,6456 \quad (\text{equação 31})$$

Onde:

S_t = fator de localização topográfica;

A, B = parâmetros adimensionais;

X = comprimento horizontal a partir do topo do cume, em m;

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

L_e = comprimento efetivo, 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.

b) Sotavento para taludes:

$$S_t = A \cdot \left(\log \left[\frac{X}{L_e}\right]\right)^2 + B \cdot \left(\log \left[\frac{X}{L_e}\right]\right) + C \rightarrow 0,1 \leq \frac{X}{L_e} \leq 3,5 \text{ e } 0,1 \leq \frac{Z}{L_e} \leq 2 \quad (\text{equação 32})$$

$$A = -1,3420 \cdot \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right)^3 - 0,8222 \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right)^2 + 0,4609 \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right) - 0,0791 \quad (\text{equação 33})$$

$$B = -1,0196 \cdot \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right)^3 - 0,8910 \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right)^2 + 0,5343 \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right) - 0,1156 \quad (\text{equação 34})$$

$$C = 0,8030 \cdot \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right)^3 + 0,4236 \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right)^2 - 0,5738 \left(\log \left[\frac{Z}{L_e}\right]\right) + 0,1606 \quad (\text{equação 35})$$

Onde:

S_t = fator de localização topográfica;

A, B, C = parâmetros adimensionais;

X = comprimento horizontal a partir do topo do cume, em m;

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

Quando a razão estiver entre $0 \leq X/L_e \leq 0,1$, deve-se interpolar os valores. Quando $Z/L_e < 0,1$ usar $Z/L_e = 0,1$. Quando $X/L_e > 3,5$ ou $Z/L_e > 2$ o valor para o fator de localização topográfica dever ser considerado $S=0$.

c) Sotavento para morros:

$$S_t = A \cdot e^{\left(\frac{B \cdot X}{L_d}\right)} \rightarrow 0 \leq \frac{X}{L_d} \leq 2 \text{ e } 0 \leq \frac{Z}{L_e} \leq 2 \quad (\text{equação 36})$$

$$A = 0,1552 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right)^4 - 0,8575 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^3 + 1,8133 \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 - 1,9115 \left(\frac{Z}{L_e}\right) + 1,0124 \quad (\text{equação 37})$$

$$B = -0,3056 \cdot \left(\frac{Z}{L_e}\right)^2 + 1,0212 \left(\frac{Z}{L_e}\right) - 1,7637 \quad (\text{equação 38})$$

Onde:

S_t = fator de localização topográfica;

A, B = parâmetros adimensionais;

X = comprimento horizontal a partir do topo do cume, em m;

L_d = comprimento à sotavento, em m;

L_e = comprimento efetivo, em m.

Quando a razão $X/L_d > 2$ ou $Z/L_e > 2$ o valor para o fator de localização topográfica dever ser considerado $S=0$.

Assim, o valor do fator topográfico é definido pelas equações 39 e 40. Caso o ângulo for menor que 0,05 o $C_t = 1,0$ (CEN, 2010):

$$C_t = 1 + 2 \cdot S_t \times \theta \quad \rightarrow \quad 0,05 < \theta < 0,3 \quad (\text{equação 39})$$

$$C_t = 1 + 0,6 \cdot S_t \quad \rightarrow \quad \theta > 0,3 \quad (\text{equação 40})$$

Onde:

C_t = fator topográfico, adimensional;

θ = declividade;

S_t = fator de localização topográfica, adimensional.

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, da mesma forma que a Norma brasileira, no conceito de “equivalência estática de carga de vento”. Diferentemente da brasileira, a japonesa introduz o efeito da direcionalidade do vento para o cálculo da velocidade do vento de projeto, ou velocidade característica. Além do efeito da direcionalidade, a velocidade básica também é ajustada pelos fatores topográfico, de exposição e de conversão do período de retorno (AIJ, 2004).

3.7.1 Velocidade básica e de projeto do Vento – AIJ

A velocidade básica do vento V_{AIJ} , 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 topografia plana em campo aberto.

A velocidade de projeto ou característica V_P é a velocidade básica V_{AIJ} ajustada pelos fatores: direcionalidade do vento (K_D), perfil de velocidades do vento a uma altura (E_H) e pela conversão do período de recorrência (K_{rW}). Este valor de V_P , geralmente, é maior que a V_{AIJ} e pode ser descrita pela equação 41 (AIJ, 2004):

$$V_P = V_{AIJ} \cdot K_D \cdot E_H \cdot K_{rW} \quad (\text{equação 41})$$

Onde:

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

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

K_D = fator de direcionalidade do vento, adimensional;

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

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

3.7.2 Fator de direcionalidade do vento – AIJ

O fator de direcionalidade do vento K_D é responsável pelas características de direção do vento em condições extremas, as quais são influenciadas pelas localizações geográfica e topográfica. Segundo a AIJ (2004), o fator de direcionalidade varia entre 0,85 a 1 e é considerado para oito direções cardinais, conforme a localização considerada. Para a inclusão do fator de direcionalidade, é necessário que, o local a ser analisado, seja próximo das estações meteorológicas, visto que ocorrem grandes erros se em locais afastados. Devido ao fato deste fator minimizar a velocidade, de forma conservadora e para evitar equívocos é interessante utilizá-lo sendo $K_D = 1$. Para equalizar os dados obtidos com a Norma brasileira, foi utilizado, neste trabalho, este fator igual a 1.

3.7.3 Fator do perfil de velocidades do vento – AIJ

O fator do perfil de velocidades do vento E_H é a consideração do fator de exposição para terrenos planos E_r e o fator topográfico S_1 no local considerado. Assim é definido conforme a equação 42 (AIJ, 2004):

$$E_H = E_r \cdot S_1 \quad (\text{equação 42})$$

Onde:

E_H = fator do perfil de velocidades do vento, adimensional;

E_r = fator de exposição para terrenos planos, adimensional;

S_1 = fator topográfico, adimensional.

3.7.3.1 Fator de exposição para terrenos planos – AIJ

O fator de exposição é classificado em cinco categorias diferentes, contemplando situações de terrenos abertos até os muito rugosos. Para regiões nas quais 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 10 apresenta as categorias em função da condição do terreno.

Quadro 10 – Categorias em função da condição do terreno (AIJ)

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 (4 a 9 pavimentos)
IV	Cidades, grandes edificações (4 a 9 pavimentos)
V	Cidades, com grande concentração de grandes edificações (maior que 10 pavimentos)

(fonte: adaptado de AIJ, 2004)

O fator de exposição de terrenos planos é definido pela altura acima do terreno e por parâmetros, conforme equações 43 e 44 (AIJ, 2004):

$$E_r = 1,7 \cdot \left(\frac{Z}{Z_G}\right)^\alpha \rightarrow Z_b < Z \leq Z_G \quad (\text{equação 43})$$

$$E_r = 1,7 \cdot \left(\frac{Z_b}{Z_G}\right)^\alpha \rightarrow Z \leq Z_b \quad (\text{equação 44})$$

Onde:

E_r = fator de exposição para terrenos planos, adimensional;

Z = altura acima do terreno, em m;

Z_b, Z_G, α = parâmetros para determinação de E_r , em metros (quadro 11)

Quadro 11 – Parâmetros para determinação do fator de exposição (AIJ)

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

(fonte: adaptado de AIJ, 2004)

3.7.3.2 Fator topográfico – AIJ

O fator topográfico S_1 considera as mudanças da topografia na região, que ocorrem quando o escoamento passa por uma região com, por exemplo, morros, taludes, montanhas. Em

consequência das diferentes topografias, ocorrem mudanças nas velocidades médias do vento. Assim, S_1 é definido pela equação 45 e a inclinação do terreno é descrito pela equação 46 (AIJ, 2004):

$$S_1 = (C_1 - 1) \cdot \left[C_2 \cdot \left(\frac{Z}{d} - C_3 \right) + 1 \right]^{-c_2 \cdot \left(\frac{Z}{d} - C_3 \right)} + 1 \rightarrow S_1 \geq 1 \quad (\text{equação 45})$$

$$\theta = \frac{d}{2 \cdot L_S} \quad (\text{equação 46})$$

Onde:

S_1 = fator topográfico;

C_1, C_2, C_3 = parâmetros para determinação do fator topográfico, os quais dependem da inclinação do terreno, adimensional (quadro 12 ou 13);

Z = altura acima do terreno, em m;

d = altura do terreno, em m;

L_S = distância horizontal considerada a $d/2$, em m;

θ = ângulo de inclinação do terreno, em graus.

Para inclinações menores que $7,5^\circ$ ou menores que X_s/d , como mostrado nas nos quadros 12 e 13, não é necessário calcular o efeito topográfico, e se adota o valor 1. Se a inclinação do terreno (equação 45) for um ângulo maior que 60° , o valor assumido para os cálculos é 60° . As figuras 30a e 30b esquematizam exatamente cada variável para o cálculo da inclinação do terreno para taludes e morros, respectivamente.

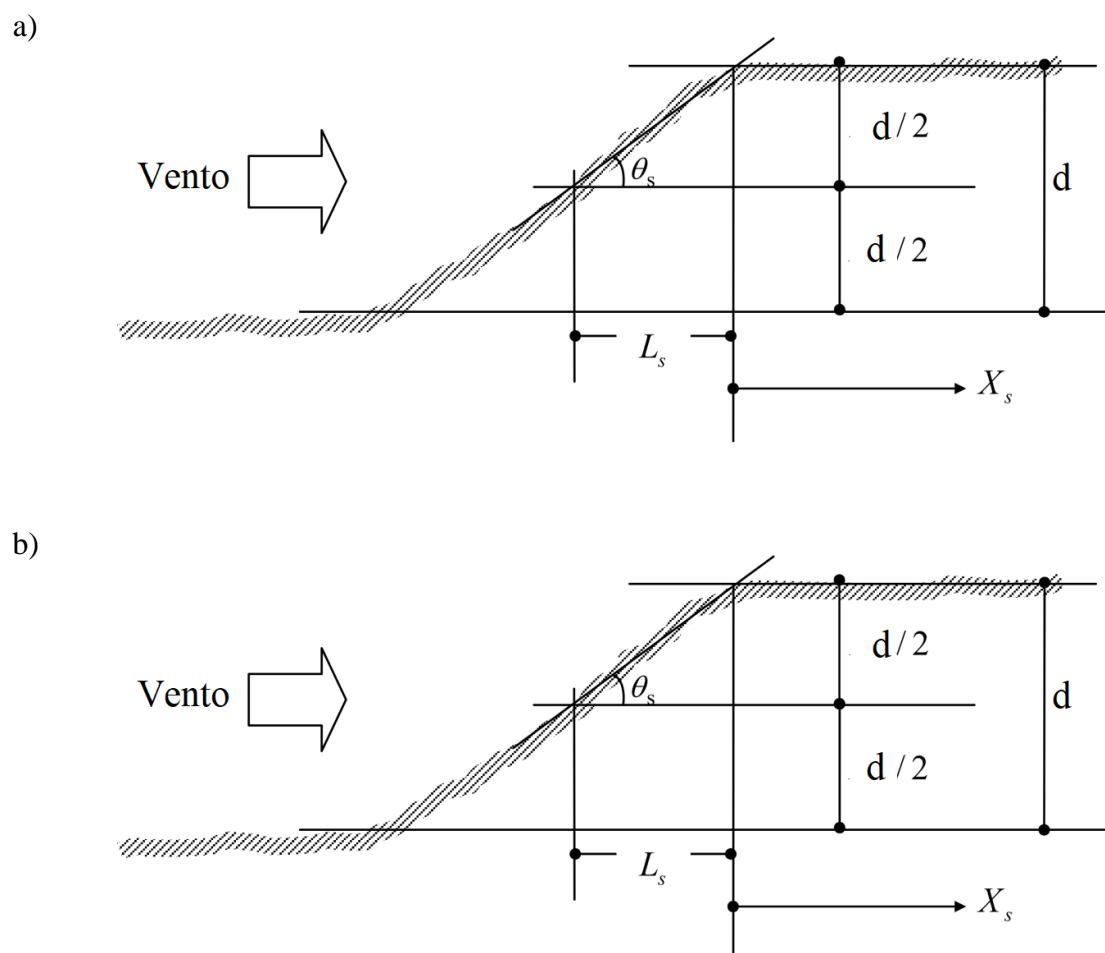


Figura 30 – Esquematização para talude (a) e morro (b) (AIJ – Recommendations for Loads on Buildings) (fonte: adaptado de AIJ, 2004)

Os parâmetros C_1 , C_2 e C_3 variam conforme o ângulo e são diferenciados entre taludes (quadro 12) e morros (quadro 13). Para valores intermediários, que não constam no quadro, é necessário fazer interpolações.

Quadro12 – Parâmetros para determinação do fator topográfico para taludes (AIJ)

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

(fonte: adaptado de AIJ, 2004)

Quadro13 – Parâmetros para determinação do fator topográfico para morros (AIJ)

Morros											
θ_s	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: adaptado de AIJ, 2004)

3.8 MODELO ANALÍTICO DE JACKSON E HUNT (1975)

O modelo analítico, proposto pelos pesquisadores Jackson e Hunt (1975), tornou-se, em meados da década de 1970, um marco para a modelagem analítica do escoamento do vento em morros. Muito antes dessa publicação, pesquisadores como, por exemplo, Scorer (1953, 1956) e Corby

e Wallington (1956), já haviam estudado os efeitos da topografia no escoamento do vento, por meio de ensaios em túnel de vento e medições em campo.

No estudo proposto por Jackson e Hunt (1975), os autores apresentaram uma solução analítica para o escoamento de vento sobre um morro bidimensional com pequena curvatura. O escoamento é de camada limite turbulenta e adiabática com rugosidade uniforme. A teoria é válida quando:

$$\lim \frac{L}{Y_0} \rightarrow \infty \text{ quando } \frac{d}{L} < \frac{1}{8} \left(\frac{y_0}{L} \right)^{0,1} \text{ e } \frac{\delta}{L} \gg \frac{2\kappa^2}{\ln \left(\frac{\delta}{y_0} \right)}$$

Onde:

L = comprimento do morro, em m;

d = altura do morro, em m;

y_0 = comprimento de rugosidade do terreno, em m;

δ = espessura da camada limite atmosférica, em m.

Para um terreno rural, a espessura da camada limite atmosférica é de 600 m: correspondendo a um comprimento entre $10^2 < L < 10^4$ m e $d/L < 0,05$. Para o presente estudo, devido às condições apresentadas pela formulação de Jackson e Hunt (1975), não foi possível aplicá-la para os morros definidos para o estudo. Isto ocorreu por se tratarem morros muito mais íngremes que os representados por esses autores.

O escoamento do vento tem suas velocidades, direção e turbulência variando quando há um obstáculo ou uma topografia diferenciada, como, por exemplo, vales, morros e taludes. Na época dos estudos destes autores, já estudava-se a existência na mudança de escoamento em relação a topografia, porém essas 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: avaliou os efeitos causados, no perfil de velocidades, quando o vento incidia em morros.

No estudo de Jackson e Hunt (1975), o escoamento foi dividido em duas regiões distintas denominadas camadas interior e exterior, sendo, a camada interior, a região da espessura da

camada limite atmosférica (δ). A camada exterior, por sua vez, compreende as alturas acima da região da espessura da camada limite atmosférica. Para escoamentos fora da zona separação, ou seja, $d/L \ll 1$ 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. As equações 47 e 48 mostram essas relações (JACKSON; HUNT, 1975):

$$\Delta u(x, Z) = \frac{d}{L} \cdot \sigma_u(x, Z) \cdot u_0(L) \quad (\text{equação 47})$$

$$u_0(L) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{L}{Z_0}\right) \quad (\text{equação 48})$$

Onde:

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

d = altura do morro, em m;

Z = altura acima do terreno, em m;

L = distância horizontal a partir da crista, em m;

x = posição de análise a partir da crista, m;

$\sigma_u(x, Z)$ = 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, adimensional;

$u_0(L)$ = velocidade de referência quando $Z=L$, em m/s;

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

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

Z_0 = comprimento de rugosidade do terreno para a região à barlavento do escoamento, em m.

Os autores apresentaram soluções analíticas generalistas, porém podem ser parametrizadas para várias formas de morros e taludes. No caso da formulação para morros sinusoidais, ou seja, em forma de sino (figura 31) a função de forma que deve ser utilizada é apresentada pela equação

49, a qual considera apenas a distância horizontal até a meia altura e, a distância horizontal, a partir do cume até o ponto analisado (JACKSON; HUNT, 1975):.

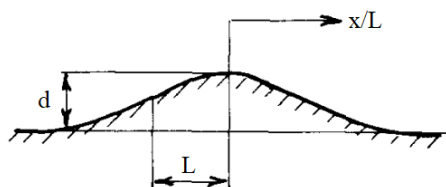


Figura 31 – Esquematização para morro em forma de sino (modelo analítico de Jackson e Hunt (1975) (fonte: adaptado de BOWEN, 1983)

$$\sigma_u(x, Z) = \frac{\left[\left[1 + \left(\frac{Z}{L} \right) \right]^2 - \left[\left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \right]}{\left[\left[1 + \left(\frac{Z}{L} \right) \right]^2 + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right]^2} \quad (\text{equação 49})$$

Onde:

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

Z = altura acima do terreno, em m;

L = distância horizontal a partir da crista, em m;

x = posição de análise a partir da crista, em m.

Parametrizando a formulação para morros triangulares (figura 32), a função de forma que deve ser utilizada é apresentada pela equação 50, a qual considera apenas a distância horizontal até meia altura e, a horizontal, a partir do cume até o ponto analisado.

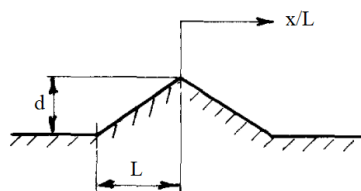


Figura 32 – Esquematização para morro triangular (modelo analítico de Jackson e Hunt (1975) (fonte: adaptado de BOWEN, 1983)

$$\sigma_u(x, Z) = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{\left[\left(\frac{x}{L} - 1 \right)^2 + \left(\frac{Z}{L} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{x}{L} + 1 \right)^2 + \left(\frac{Z}{L} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{Z}{L} \right)^2 + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right]^2} \right] \quad (\text{equação 50})$$

Onde:

$\sigma_u(Z)$ = função de forma, adimensional;

Z = altura acima do terreno, em m;

L = distância horizontal a partir da crista, em m;

x = posição de análise a partir da crista, em m.

Parametrizando a formulação para um talude (figura 33), a função de forma que deve ser utilizada é apresentada pela equação 51, a qual considera apenas a distância horizontal até meia altura e , a horizontal, a partir do cume até o ponto analisado.

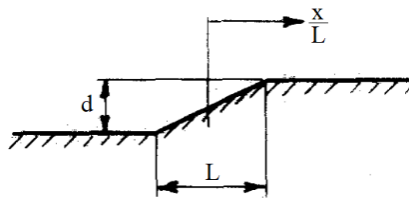


Figura 33 – Esquemática para talude (modelo analítico de Jackson e Hunt (1975) (fonte: adaptado de BOWEN, 1983)

$$\sigma(x, Z) = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{\left[\left(\frac{x}{L} + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{Z}{L} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{Z}{L} \right)^2 \right]} \right] \quad (\text{equação 51})$$

Onde:

$\sigma(Z)$ = função de forma, adimensional;

Z = altura acima do terreno, em m;

L = distância horizontal a partir da crista, em m;

x = posição de análise a partir da crista, em m.

3.9 MODELO ANALÍTICO DE LEMELIN et al. (1988)

O modelo analítico LSD, de Lemelin, Surry e Davenport (LEMELIN et al., 1988), é um método simplificado para o cálculo do incremento de velocidades. Este método consiste em estimar o aumento da velocidade, para um escoamento neutramente estratificado em qualquer altura acima do nível do terreno e, também, em qualquer direção do vento para um modelo bi ou tridimensional.

Ao considerar o escoamento do vento junto a um morro ou talude, o fator de exposição, segundo formulação apresentada por esses autores, apresenta um cálculo diferenciado, sendo chamado de fator de exposição modificado e fica definido pela equação 52 (LEMELIN et al., 1988):

$$C_{em} = C_e(Z) \cdot (1 + \Delta V)^2 \quad (\text{equação 52})$$

Onde:

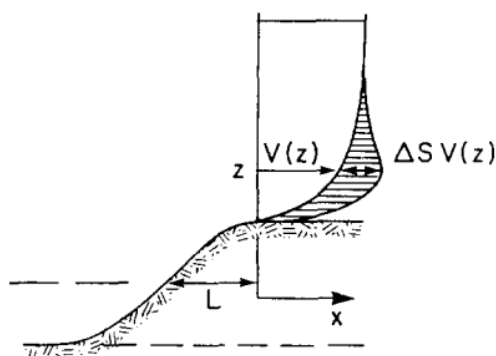
C_{em} = fator de exposição modificado, adimensional;

$C_e(Z)$ = fator de exposição, adimensional;

ΔV = velocidade incremental m/s.

A figura 34 apresenta, esquematicamente, os parâmetros e variáveis apresentados. A velocidade incremental pode ser aproximada por uma formulação simplificada conforme mostra a equação 53, a qual é referida como abordagem LSD (LEMELIN et al., 1988).

a)



b)

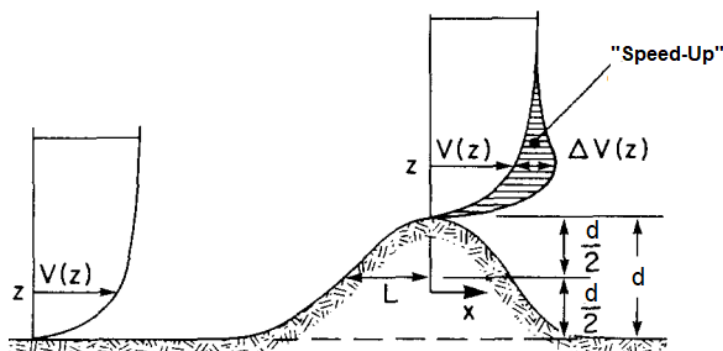


Figura 34 – Esquemática da velocidade incremental do vento em morros e taludes (modelo analítico de LSD)
(fonte: adaptado de LEMELIN et al., 1988)

$$\Delta V(X, Z) = \Delta V_{m\acute{a}x} \cdot \left(\frac{1}{1 + 3 \cdot \left(\frac{X}{n \cdot L} \right)^p} \right)^2 \times \left(\frac{1}{1 + a \cdot \frac{Z}{L}} \right)^2 \quad (\text{equa\c{c}\~{a}o 53})$$

Onde:

ΔV = velocidade incremental, em m/s;

$\Delta V_{m\acute{a}x}$ = velocidade incremental m\acute{a}xima, em m/s;

X = dist\~{a}ncia horizontal a partir do cume do morro at\~{e} o ponto de interesse, em m;

n = par\~{a}metro, adimensional;

a = par\~{a}metro, adimensional;

p = par\~{a}metro, adimensional;

Z = cota acima do terreno, em m;

L = dist\~{a}ncia horizontal medida a 50% da altura total do morro, em m.

Os par\~{a}metros de comprimento da equa\c{c}\~{a}o 52 s\~{a}o definidos em um plano vertical que cont\~{e}m o vetor do vento, a montante, e o ponto de interesse na colina. A dist\~{a}ncia “ X ” \~{e} definida como horizontal e compreende a medida do ponto mais alto do morro ao ponto de interesse. Na figura 35, s\~{a}o definidos os par\~{a}metros do modelo LSD (LEMELIN et al., 1988).

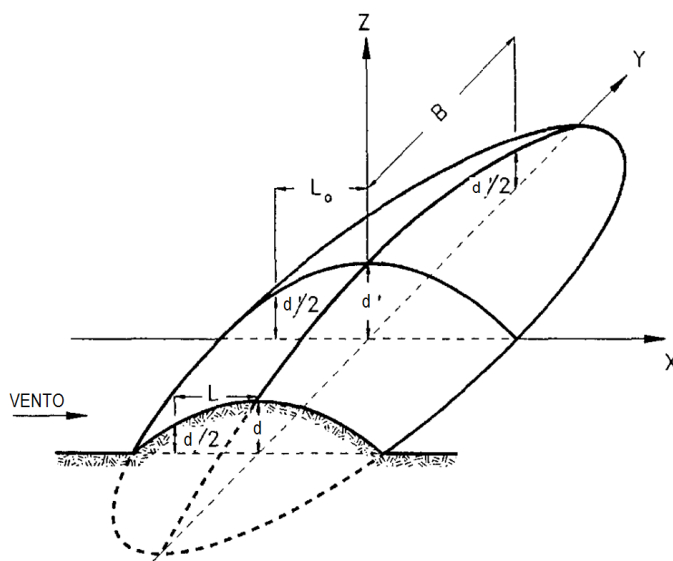


Figura 35 – Esquematização dos parâmetros (modelo analítico de LSD) (fonte: adaptado de LEMELIN et al., 1988)

Para os valores do incremento máximo de velocidade, os autores criaram dois grupos: o primeiro corresponde a taludes 2D e, o segundo, a morros 2D (ou vales com altura negativa) e 3D. Para morros 2D e 3D, ou vales, foi definido um incremento máximo de velocidade conforme a equação 54. Os parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental são descritos no quadro 14 (LEMELIN et al., 1988).

$$\Delta V_{m\acute{a}x} = 2,3 \cdot G \cdot \left(\frac{\frac{B}{L_0}}{\frac{B}{L_0} + 0,4} \right) \quad (\text{equa\c{c}\~{a}o 54})$$

Onde:

G = parâmetro, para o modelo LSD, adimensional;

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

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

Quadro 14 – Parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental de morros 3D e cumes /vales 2D (modelo analítico de 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)

Para taludes 2D, foi definido, neste modelo LSD, o incremento máximo de velocidade conforme a equação 55. Os parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental são definidos no quadro 15 (LEMELIN et al., 1988).

$$\Delta V_{m\acute{a}x} = 1,3. G \quad (\text{equação 55})$$

Onde:

G = parâmetro, para o modelo LSD, adimensional;

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

Quadro 15 – Parâmetros para determinação da máxima velocidade incremental de taludes 2D (modelo analítico de LSD)

$\Phi=d/L$	G	L	a	x	n	p
$\leq 1,0$	Φ	d/Φ	2,0	$x \leq 0$	1,0	2,0
				$x > 0$	5,0	1,0
$> 1,0$	1,0	d	0,6	$x \leq 0$	0,5	2,0
				$x > 0$	10,0	1,0

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

Segundo Lemelin et al. (1988), o modelo pode ser empregado para morros regulares nos quais a variabilidade da rugosidade no entorno seja pequena, quando comparada com as suas dimensões globais. Os autores consideram que, para morros mais íngremes, a formulação é aproximada, visto que há uma grande probabilidade de separação do escoamento. Com isso, deve ser considerada uma seção transversal efetiva, já que para regiões mais próximas do solo há redução de velocidades. O modelo LSD é válido para morros nos quais a superfície adjacente seja plana. Para superfícies com terrenos não-planos, em que o morro esteja inserido, é imprescindível a escolha de parâmetros mais conservadores, pois existem diversas incertezas quanto ao escoamento. Sendo assim, este 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 1970, iniciou-se o desenvolvimento dos primeiros modelos empíricos para o cálculo do incremento de velocidade do vento para terrenos não-planos. Um dos métodos mais conhecidos é o modelo analítico dos pesquisadores Jackson e Hunt (1975), detalhado neste trabalho, e que foi utilizado como base para algumas normas técnicas existentes em vários lugares do mundo.

A influência da topografia no escoamento do vento é determinada, em normas e modelos analíticos, por fator topográfico ou de incremento de velocidades. Esses fatores consideram a forma do terreno, ou seja, suas dimensões horizontal e vertical, e, também, a distância do ponto de maior altura ao ponto analisado. Porém, algumas normas, como, por exemplo, a brasileira, considera a inclinação média da topografia. Assim, com o objetivo de comparar os conceitos básicos dos modelos, esse breve estudo exemplifica e correlaciona os modelos. Nesta comparação, os efeitos de direcionalidade e sazonalidade são 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 16, podem ser observados os conceitos de cada norma.

Quadro 16 – Comparação entre as formas de definição das velocidades básicas nas normas analisadas

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 (2010)	média horária	50 anos	10 metros	terreno aberto e plano
EUROCODE 1 (2005)	velocidade 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 médias é descrito, especificamente, por três Leis: Logarítmica (equação 56); de Potência (equação 57) e da formulação de Deaves & Harris (1981). Embora a Lei Logarítmica seja a mais apropriada, matematicamente, e a mais utilizada 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 semiempírico também chamado de logarítmica com deflexão parabólica, a formulação proposta por Deaves & Harris é descrita pela equação 58.

$$V = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} \right] \quad (\text{equação 56})$$

$$\frac{V}{V_{ref}} = \left[\frac{z}{z_{ref}} \right]^\alpha \quad (\text{equação 57})$$

$$V = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} + 5,75 \cdot \left(\frac{z}{\delta} \right) - 1,88 \cdot \left(\frac{z}{\delta} \right)^2 - 1,33 \cdot \left(\frac{z}{\delta} \right)^3 + 0,25 \cdot \left(\frac{z}{\delta} \right)^4 \right] \quad (\text{equação 58})$$

Onde:

V = velocidade média do vento na altura z acima do terreno, em m/s;

V_{ref} = velocidade média do vento arbitrada em uma altura z_{ref} , em m/s;

u_* = velocidade de atrito, em m/s;

z_0 = comprimento de rugosidade, em m;

z_{ref} = altura de referência acima do terreno, em m;

δ = espessura da camada limite atmosférica, em m;

α = expoente da lei de potência, adimensional.

A figura 36 apresenta, para cada norma, a lei empregada para definição do perfil de velocidades.

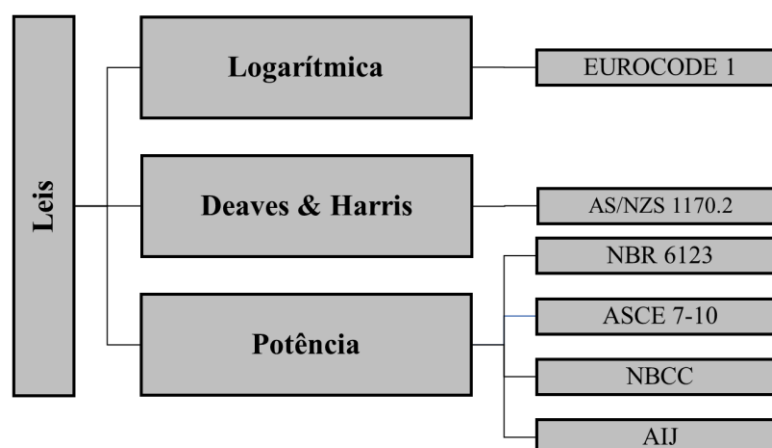


Figura 36 – Emprego das Leis Logarítmica, de Potência e da formulação de Deaves & Harris para definição do perfil de velocidades em cada norma (fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2010); AIJ (2004)).

As categorias de exposição, para as normas analisadas, variam entre duas e cinco. Quando comparadas entre si, as interpretações podem ser diferentes, por cada estudioso do assunto, devido à subjetividade intrínseca da divisão das categorias. O número de categorias, para as condições de exposição, por norma é a seguinte (quadro 17):

- a) duas categorias: canadense (NBCC);
- b) três categorias: americana (ASCE 7-10);
- c) quatro categorias: australiana/neozelandesa (AS/NZS);
- d) cinco categorias: brasileira, europeia, japonesa (NBR, EUROCODE, AIJ).

Quadro 17 – Comparação entre a forma de classificação, pelas normas, nas categorias de exposição

Tipo de ocupação	NBR 6123 (1988)	ASCE 7-10 (2010)	AS/NZS 1170.2 (2011)	NBCC (2010)	EUROCODE 1 (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 por Kwon e Kareem (2013), os autores realizaram uma comparação entre diversas normas. Dentre estas, estão a americana, a australiana/neozelandesa, a canadense, a europeia e a japonesa. No estudo, os autores criam uma nova escala de categorias, de 1 a 6, e demonstram que cada pesquisador pode interpretar de uma maneira diferente a divisão entre as categorias (quadro 18).

Quadro 18 – Comparação entre categorias de exposição

Tipo de ocupação	Sigla	ASCE 7-10 (2010)	AS/NZS (2011)	NBCC (2005)	EUROCODE 1 (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. Os valores adotados divergem entre si, mas a ordem de grandeza é muito próxima. Logo, implica em uma pequena diferença no valor. O quadro 19 apresenta os valores adotados pelas normas em análise.

Quadro 19 – Comparação entre o comprimento de rugosidade Z0 das normas analisadas

Tipo de ocupação	NBR 6123 (1988)	ASCE 7-10 (2010)	AS/NZS 1170.2 (2011)	NBCC (2010)	EUROCODE 1 (2010)
terreno aberto e plano, superfície lisa, mar	0,005	0,005	0,002	Em termos de α	0,003
terreno aberto e plano, poucos obstáculos	0,07	-	0,02	Em termos de α	0,01
terreno plano ou ondulado, edificações baixas e esparsas	0,3	0,02	0,2	Em termos de α	0,05
terrenos com obstáculos numerosos	1	0,3	-	Em termos de α	0,3
terrenos com obstáculos numerosos, altos e pouco espaçados	2,5	-	2	-	1

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

Além dos estudos dos pesquisadores Kwon e Kareem (2013), também, Stathopoulos et al. (2009) fizeram um estudo com o uso de diferentes normas que são: americana (ASCE, 2005), australiana/neozelandesa (AS/NZS, 2002), canadense (NBCC, 2005) e britânica (BS, 1997). Estes autores chegaram aos mesmos resultados de Kwon e Kareem (2013), apresentados no quadro 19, e os dividiram em apenas em quatro categorias de exposição.

Outra diferença relevante entre as normas são os limites inferior e superior da inclinação do terreno, ou seja, os limites dos ângulos de inclinação (quadro 20). A inclinação mínima é responsável pela identificação dos efeitos da velocidade incremental de vento, e, a máxima, corresponde ao limite a partir do qual é formada a zona de separação. O quadro 20 apresenta, também, as diferenças entre esses limites superior e inferior.

Quadro 20 – Comparação entre os limites inferior e superior das inclinações de terreno consideradas das normas

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 1170.2 (2011)	5	45	40
BS 6399-2 (1997)	5	30	25
NBCC (2005)	10	25	15
EUROCODE 1 (2005)	5	30	25
AIJ (2004)	13,2	173,2	160

(fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); AS/NZS (2011); NRCC (2010); CEN-TC (2010); 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 abrangência horizontal que recebia a influência dos efeitos da velocidade incremental. As normas analisadas foram: americana (ASCE, 2005), australiana/neozelandesa (AS/NZS, 2002), japonesa (AIJ, 2004) e europeia (CEN, 2002). O quadro 21 detalha essa comparação de valores.

Quadro 21 – Comparação entre a área de abrangência horizontal de normas sobre a ação do vento em edificações

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 âmbito das cotas máximas e mínimas, acima do nível do terreno, nas quais ocorrem variações nas velocidades do vento, apenas algumas normas adotam este tipo de consideração. Esses valores são especificados para as normas brasileira, americana, europeia e japonesa (quadro 22). As normas australiana/neozelandesa e canadense não os explicitam.

Quadro 22 – Comparação entre valores máximos e mínimos da altura acima do terreno nas quais ocorrem variações na velocidade do vento

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

(fonte: ABNT (1988); ASCE (2010); CEN (2010); AIJ (2004))

Ao comparar as normas relativas à ação do vento em edificações, é perceptível que cada uma tem um método de cálculo e parâmetros específicos, adaptados para a região, com suas peculiaridades de incidência de vento, em que a normativa é aplicável. Por isso, ao comparar as normas, primeiramente, é necessário ter bom senso e observar quais os parâmetros que são abordados em todas as normas, como é o caso do fator topográfico. Parâmetros, como, por exemplo, o efeito de direcionalidade e a sazonalidade não são abordados em todas normas e, geralmente, são fatores que amenizam os efeitos do vento, ou seja, são menores que 1. Para efeitos de comparação entre as normas, no presente trabalho, esses fatores serão adotados iguais a 1, já que a normativa brasileira não considera seus efeitos e é a base desse estudo.

4 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO: METODOLOGIA EXPERIMENTAL ADOTADA

Este capítulo aborda a técnica de laboratório utilizada nos ensaios, em túnel de vento, desde o projeto e a fabricação dos modelos ensaiados até os métodos de aquisição de dados. Além disso, são abordadas as técnicas de simulação com uso de modelos reduzidos.

4.1 INTRODUÇÃO

O túnel de vento é uma importante ferramenta para a avaliação do escoamento e das características do vento. Através de modelos experimentais reduzidos, pode ser reproduzido, com maior precisão, o comportamento do escoamento do vento real obtido em campo. Além disso, as condições do entorno devem ser consideradas, pois a cobertura vegetal e a topografia influenciam no perfil de velocidades, turbulência e pressões devidas ao vento.

Os túneis de vento podem ter, basicamente, duas configurações, ou seja, de circuito aberto ou fechado. Quanto à velocidade do vento nos túneis, eles podem ser de baixa ou de alta velocidade. Um exemplo de túnel de alta velocidade é o que simula ventos transônicos. No entanto, existem inúmeras variações nas características entre esses túneis para ensaios, fazendo com que seja possível alcançar resultados para várias aplicações na Engenharia, como, por exemplo, aeronáuticas, automotivas, aeroacústicas, meio ambiente. O túnel descrito por Barlow et al. (1999) como sendo um túnel de vento de meio ambiente é mais conhecido como túnel de vento de camada limite atmosférica. Este mesmo tipo de túnel foi utilizado nos ensaios do presente estudo: túnel de vento de camada limite atmosférica, denominado TV-2, que é conhecido pelo nome de seu fundador Professor Joaquim Blessmann, Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS (BLESSMANN, 1982).

Túneis de vento, deste tipo, são projetados para simular a camada limite atmosférica, sendo utilizados para o carregamento de ventos em edificações, dispersão de poluentes, efeito de vizinhança, conforto de pedestres, entre outros. Diferentemente de túneis para aplicações automobilísticas, em que o escoamento é uniforme e suave, os túneis de camada limite apresentam um perfil de velocidades variável e consideram a rugosidade. Desta forma, é possível reproduzir o escoamento do vento, em túnel de vento, de maneira mais próxima ao escoamento real do vento para um escoamento adequado (BARLOW et al., 1999).

O túnel de vento de circuito aberto é a configuração mais simplificada. O escoamento é injetado, no circuito, por um dos lados e expelido por outro, podendo ser influenciado pela circulação externa. Apesar desta característica, é um túnel que apresenta bons resultados e tem a vantagem de ter menor custo de construção. O túnel de circuito fechado, por não ser influenciado por circulação externa, apresenta um escoamento em que as variáveis podem ser controladas e ajustadas mais facilmente, tornando-se mais eficiente que o túnel de circuito aberto. Neste tipo de circuito, podem ser incorporadas diversas mesas de ensaio com diferentes características conforme a necessidade (HOLMES, 2001).

O escoamento, no interior de um túnel de vento, deve representar a realidade o mais fielmente possível e, isso se deve manter quando o escoamento estiver passando por um obstáculo: um edifício ou uma montanha. Para que isso ocorra, é imprescindível que as características físicas sejam reproduzidas consoante ao que é encontrado na natureza. Assim, se espera que os perfis de velocidade e intensidade de turbulência serão o mais coerente possível com a situação real. Nos estudos de Takahashi et al. (2002), os autores, além de manter as propriedades físicas coerentes, observaram três 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 et al., 2002).

O escoamento em túnel de vento pode ser uniforme, ou seja, a velocidade do vento não varia com a altura. Para estudos de camada limite, é necessário que a velocidade do escoamento seja variável com a altura e, para que isso ocorra, são utilizados alguns artifícios. Dependendo do tipo de escoamento, são utilizados artifícios no chão do túnel e, desse modo, se garante que a rugosidade também seja adequada. A rugosidade é uma das propriedades físicas de grande importância para o escoamento de camada limite atmosférica. Cao e Tamura (2006) compararam diversos modelos reduzidos em túnel de vento, sendo uma das variáveis a rugosidade do terreno. Na conclusão do estudo é notável que, quando há rugosidade no terreno e, também, nos obstáculos, como um morro, as velocidades incrementais no seu topo são maiores do que num terreno não rugoso.

4.2 TEORIA DA SEMELHANÇA

A simulação em túnel de vento requer que a semelhança física seja cumprida. Para tanto, as semelhanças geométrica, dinâmica e cinemática que a englobam devem ser cumpridas. Isto é

necessário para que se possa reproduzir nos ensaios as mesmas condições que são encontradas na natureza. Dessa forma, as condições do entorno a estrutura também devem ser semelhantes à realidade, como por exemplo, a rugosidade, topografia, vegetação e detalhes arquitetônicos.

A semelhança geométrica ocorre quando dois objetos são geometricamente semelhantes, ou seja, tenham mesmo formato e com medidas proporcionais. A semelhança cinética é aquela que traduz o movimento dos corpos, sem se preocupar 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 induzem o objeto ao movimento, diferentemente da semelhança cinética. Para tanto, é necessário que as relações de força sejam proporcionais entre a estrutura real e o modelo reduzido (BLESSMANN, 2011, p.60).

As semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica, acima descritas, devem ser proporcionais entre a estrutura real e o modelo reduzido. Para o estudo em topografia, só serão analisadas as semelhanças geométrica e cinética. Dentre as relações, pode-se citar as escalas de comprimento, tempo e velocidades. O fator de escala de comprimento (equação 59), é a relação entre os comprimentos do modelo reduzido e do seu correspondente na estrutura real:

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (\text{equação 59})$$

O fator de escala de tempo é dado pela inversão do fator de escala de frequência (equação 60):

$$\lambda_T = \frac{1}{\lambda_f} \quad (\text{equação 60})$$

O fator de escala de velocidades é dado pela razão entre as velocidades do modelo e da estrutura real (equação 61). Esse fator também pode ser calculado através do produto entre os fatores de comprimento e de frequência:

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{L_m}{t_m}}{\frac{L_p}{t_p}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} = \lambda_L \cdot \lambda_f \quad (\text{equação 61})$$

Onde:

λ_v = fator de escala de velocidades, adimensional;

λ_f = fator de escala de frequência, adimensional;

λ_L = fator de escala de comprimento, adimensional;

L_m = comprimento do modelo, em m;

L_p = comprimento do protótipo, em m;

λ_T = fator de escala de tempo, adimensional;

V_m = velocidade do modelo, em m/s;

V_p = velocidade do protótipo, em m/s.

4.3 REPRODUÇÃO DA CAMADA LIMITE

A reprodução adequada da camada limite atmosférica, em túnel de vento, bem como as semelhanças físicas entre a estrutura real e o modelo reduzido, deve contemplar os efeitos do escoamento do vento. Dessa forma, é necessário o uso de dispositivos mistura tais como: rugosidade, barreiras e dispositivos mistos. Estes dispositivos são fundamentais para que a estrutura da camada limite atmosférica, ou seja, o perfil de velocidades e turbulência sejam compatíveis com os dados reais. Nos ensaios, em túnel de vento, a rugosidade da superfície tem fundamental importância, pois estabelece um perfil de tensões de Reynolds através da camada. O perfil de tensões de Reynolds tem por objetivo controlar as características do vento, como por exemplo, o perfil de velocidades e as características de turbulência do escoamento. Além disso, a rugosidade superficial influencia três parâmetros da lei logarítmica que são fundamentais para conformar o perfil de velocidades. 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, e podem ser empregados separadamente ou concomitante a outros dispositivos físicos. Estes métodos influenciam na quantidade de movimento ao nível do piso do túnel e também na altura da camada limite atmosférica. Os métodos citados pelas alíneas a a g têm como característica em comum o uso de corpos sólidos para reproduzir as características do escoamento do vento. Em consequência disso, há uma tendência de redução da velocidade média do túnel de vento (BLESSMANN, 2011).

Segundo Blessmann (2011), o dispositivo de barreiras pode ser implementado por meio de diferentes formas para obtenção de determinados efeitos:

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

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. Outra forma de usar este dispositivo é o lançamento de jatos múltiplos direcionais com intensidades variáveis (BLESSMANN, 1982). O método de dispositivos de mistura não causa redução da velocidade média do vento, diferentemente dos dispositivos de rugosidade e barreira. Isso é devido a quantidade de movimento adicionada, ao escoamento longitudinal que aumenta a velocidade. 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 de barreira e de mistura variam de diferentes formas: pelas dimensões dos próprios dispositivos ou pelas distâncias que esses estão em relação ao elemento a ser analisado. Na maior parte dos casos, estes dispositivos são utilizados em conjunto para a formação do escoamento mais próximo à realidade. Eles, geralmente, possuem interação entre si, influenciando na formação da camada limite atmosférica (LOREDO-SOUZA et al., 2004). Na figura 37 podem ser observados exemplos de dispositivos de rugosidade, de mistura e barreira, os quais são fundamentais para a adequada formação da camada limite atmosférica (COOK et al., 1973).

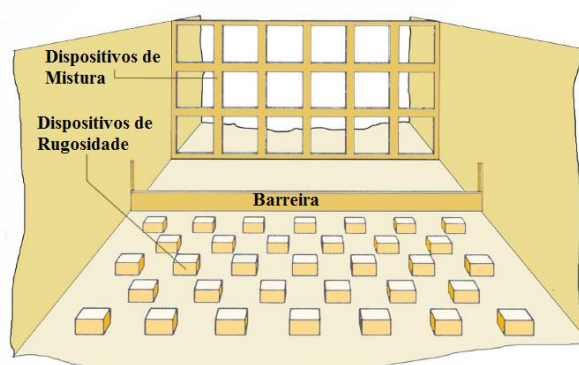


Figura 37 – Exemplo de arranjo de dispositivos para formação da camada limite atmosférica (fonte: adaptado de COOK, 1973)

4.4 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN

Os ensaios experimentais desta pesquisa foram realizados no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS. A configuração deste túnel é de circuito fechado e podem ser realizados ensaios experimentais estáticos e dinâmicos para modelos reduzidos de edificações da Construção Civil. Este túnel de vento pode reproduzir ventos de até 46 m/s, com escoamento uniforme e suave, sem a presença de modelos em seu interior. A relação comprimento/altura da câmara principal é de 10,3 e suas dimensões são de 130/90/932 cm, correspondendo, respectivamente, a largura, altura e comprimento. Para o funcionamento o túnel possui um motor elétrico de 100 HP de potência, que aciona as hélices do ventilador fazendo com que o ar circule no interior do túnel (BLESSMANN, 2011). A velocidade do escoamento é controlada a partir de um dispositivo inversor de frequências.

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 38 Para a execução dos

ensaios experimentais deste trabalho será utilizada a mesa M-II, na qual é possível obter o perfil de velocidades desejado, considerando medições a barlavento, no cume e a sotavento dos modelos. Cada mesa possui aplicações específicas que são descritas, a seguir, nas alíneas (BLESSMANN, 2011):

- 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; modelos reduzidos de Construção Civil com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores e/ou outras seções; estudos de instabilidade aerodinâmica com modelos 2D.
- c) Mesa M-III: utilizada, especialmente, para ensaios dinâmicos em estruturas com altura significativa;
- d) Mesa M-IV: localizada no retorno do túnel, com seção transversal é de 240/210 cm, é utilizada para ensaios de dissipação de poluentes, topografia, modelos de pontes, entre outros.

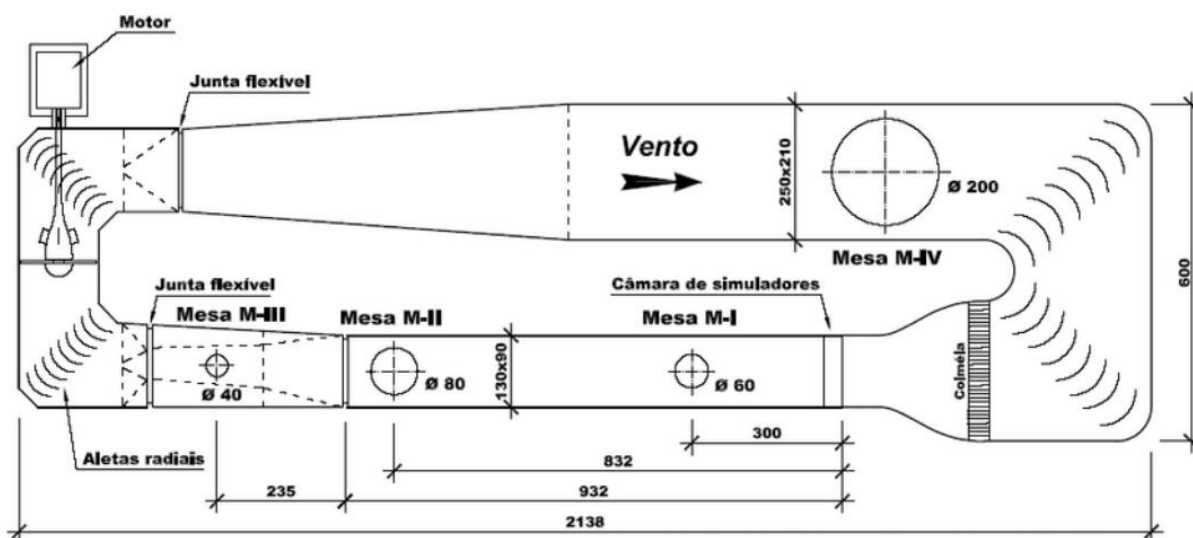


Figura 38 – Esquema das mesas do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann (cm) (fonte: LAC UFRGS, 2020)

Blessmann (2011) indica que os modelos topográficos devem ser ensaiados na mesa M-IV, porém, pelas características dos modelos reduzidos, logística de equipamentos de aquisição e conformação adequada da camada limite, nesta tese se optou por ensaiá-los na mesa M-II.

4.4.1 Simulação do vento natural

O vento simulado para realização dos ensaios experimentais, em túnel de vento, é do tipo deslizante e turbulento. O perfil de velocidades médias, o qual reproduz a variação vertical da velocidade média do vento em uma seção do túnel, é descrito através da lei de potência (equação 62).

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{equação 62})$$

Onde:

$V(z)$ = velocidade média na cota z , em m/s;

V_{ref} = velocidade de referência na cota z_{ref} , em m/s;

z_{ref} = cota de referência, 450 mm a partir do piso do túnel de vento, em m;

z = cota vertical, medida a partir do piso do túnel de vento, em m;

p = expoente da curva de potência, adimensional.

O valor do expoente p , da equação 62, é igual a 0,11, que é correspondente à categoria I da NBR 6123. Para esta categoria, o terreno contempla superfícies lisas de grandes dimensões e com mais de 5 km de extensão (no sentido do vento incidente), como, por exemplo, mar calmo, lagos, rios. Além deste valor, também será utilizado o 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). A figura 39 apresenta o perfil vertical das velocidades médias normalizada para a cota de 450mm. A intensidade de turbulência local é apresentada pela figura 40 e é definido pela equação 63.

$$I = \frac{\sigma}{V} \quad (\text{equação 63})$$

Onde:

I = intensidade de turbulência, adimensional;

σ = desvio padrão das flutuações, em m/s;

V = velocidade do vento, em m/s;

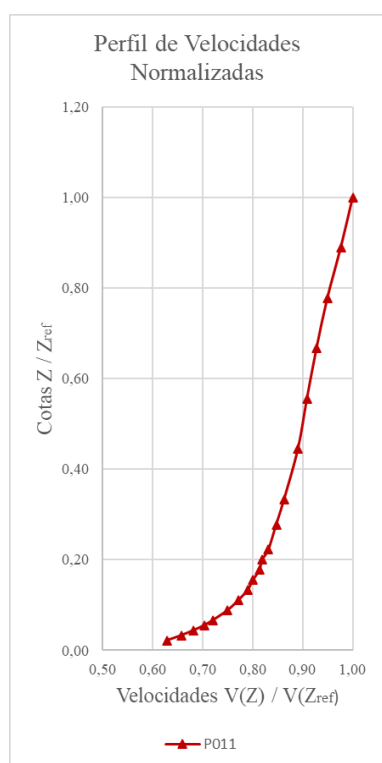


Figura 39 – Perfil vertical de velocidades médias normalizadas para $p=0,11$

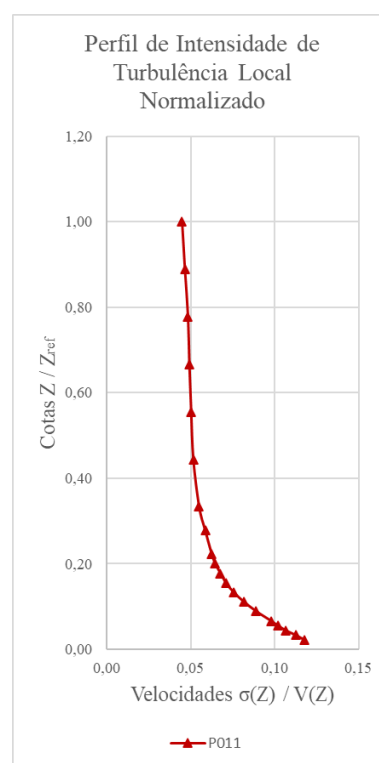


Figura 40 – Perfil vertical de velocidades de intensidade de turbulência local para $p=0,11$

4.4.2 Instrumentação e Aquisição de dados

A instrumentação e a aquisição de dados foram realizadas por meio de Anemometria a Temperatura Constante⁵ do fabricante *Dantec Dynamics*, do Sistema *Streamline 90 NS*. Neste

⁵ Anemometria a Temperatura Constante: é conhecida como Anemometria Térmica, esta técnica é utilizada para a medição da turbulência em escoamento de gases e líquidos de uma até três dimensões, utilizando sondas de fio quente ou filme quente que são inseridas no escoamento. Este método é adequado para a medição de

estudo, foram utilizados 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 utilizada uma sonda de fio quente, na qual os dados são registrados, 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, sendo adquiridos 122.880 valores para a velocidade no ponto em análise. Para as medidas de temperatura média no interior do túnel e da diferença de pressão, utilizou-se o equipamento *ManoAir 500*.

O princípio do funcionamento da sonda de fio quente baseia-se no efeito de resfriamento dos sensores introduzidos no escoamento. O Anemômetro de fio quente mede a velocidade em uma determinada posição e fornece dados de séries temporais de velocidade contínua. Estas séries podem ser processadas estatisticamente em amplitude e domínio de tempo, como por exemplo: velocidade média e intensidade de turbulência (DANTEC DYNAMICS, 2020). A figura 41 mostra o princípio de funcionamento de aquisição da sonda de fio quente até os dados fornecidos após conversão. Na figura 42 pode ser visualizada em detalhe o tipo de sonda de fio quente utilizada para os ensaios.

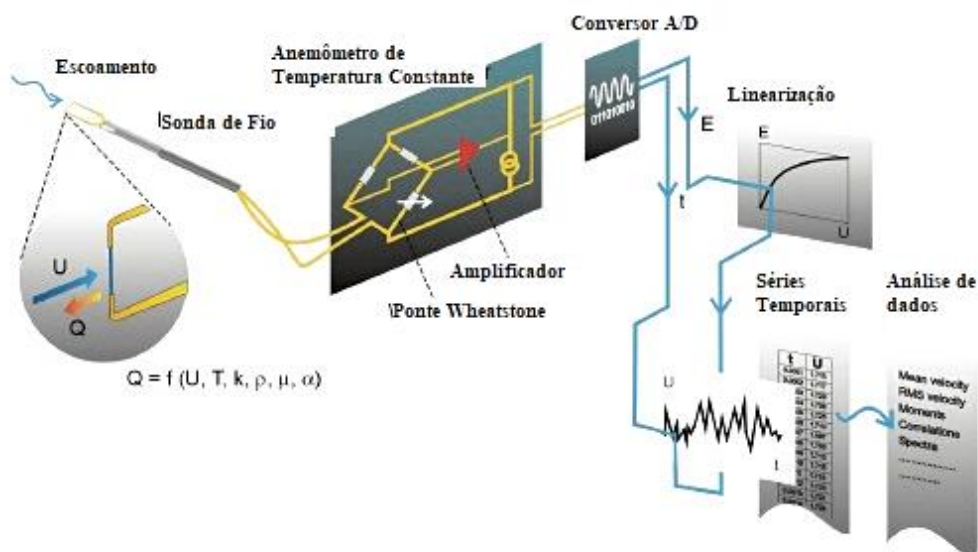


Figura 41 – Esquema de aquisição por meio de anemometria de fio quente (fonte: adaptado de DANTEC DYNAMICS, 2020)

escoamentos com flutuações muito rápidas e a análise da microestrutura deste escoamento, onde há a presença de pequenos vórtices na ordem de décimo de mm (DANTEC DYNAMICS, 2020).

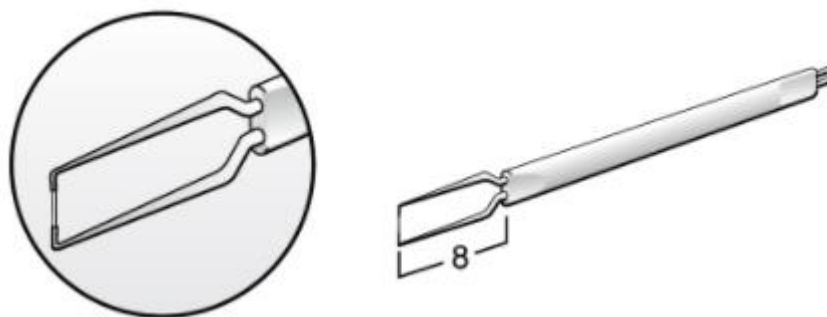


Figura 42 – Detalhe da sonda de fio quente utilizada nos ensaios experimentais (fonte: DANTEC DYNAMICS, 2020)

4.5 MODELOS REDUZIDOS

Os ensaios experimentais foram realizados por meio de modelos reduzidos, que tem como princípio modelar, de forma idealizada, os morros e taludes. Os modelos reduzidos foram classificados, conforme a seção transversal do morro, em triangulares e sinusoidais. Os modelos sinusoidais foram desenvolvidos conformes os estudos de Ferreira et al. (1995). Na dimensionalidade, sendo bidimensional ou tridimensional. Neste estudo foram inseridos patamares ao longo da superfície de inclinação ascendente e no cume dos modelos analisados. Este estudo se divide em três etapas, a primeira é uma reanálise dos dados da dissertação de Scotton (2016). Na segunda etapa são fabricados modelos com patamares no cume dos morros. Na terceira etapa são fabricados taludes 2D com patamares intermediários. As características comuns a estes morros e taludes são: a altura dos modelos $h = 150$ mm e a escala de 1:1000. O perfil de velocidades foi composto por 20 medições de velocidades médias, o intervalo de aquisição é de 60 s. Cada aquisição difere pela posição acima do terreno, ou cota, que são: 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400 e 450, todas em mm. As demais características, inerentes a cada etapa, serão descritas nos próximos itens.

4.5.1 Primeira etapa da pesquisa

A primeira etapa consiste na reanálise de alguns dos dados obtidos na dissertação de Scotton (2016). Dessa forma, não foram reensaiados e remodelados para a tese. Mesmo assim, se faz necessária a apresentação dos modelos reduzidos para o melhor entendimento dos modelos da segunda e terceira etapas. Esta etapa foi fundamental para o prosseguimento da tese, visto

que as variáveis dos modelos da dissertação serviram para escolher as variáveis dos modelos desta tese.

Os modelos da dissertação foram escolhidos por um vasto estudo, onde tiveram como base, os pesquisadores: Meroney et al. (1976), o estudo de Pearse et al. (1981), Arya e Gadiyaram (1986), Mattuella (2012). Nestes estudos os pesquisadores analisaram amplamente morros sinusoidais e triangulares, 2D e 3D, cada estudo com particularidades e objetivos diversos. Com isso, na dissertação, após uma análise da literatura das variáveis já estudadas nesta área, optou-se pelas descritas a seguir:

- a) Seção transversal: sinusoidal e triangular;
- b) Dimensionalidade: bidimensional e tridimensional;
- c) Ângulos: 13°, 20°, 35° e 45°;
- d) Rugosidade do vento: $\rho=0,11$ e $\rho=0,23$.

Na tese, a fim de otimizar os ensaios e adicionar novas variáveis, optou-se por utilizar e reanalisar os dados, obtidos na dissertação, das seguintes variáveis:

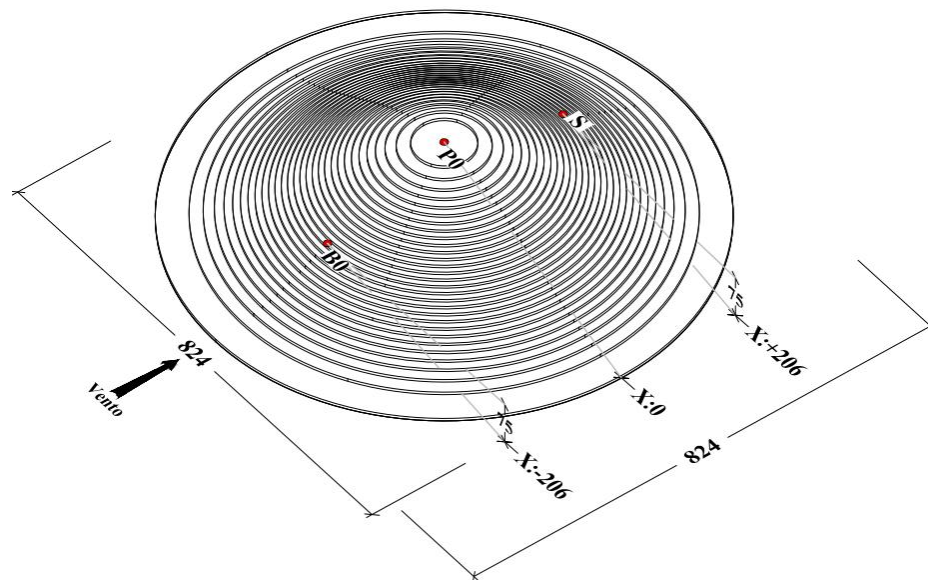
- a) Seção transversal: sinusoidal e triangular;
- b) Dimensionalidade: bidimensional e tridimensional;
- c) Ângulos: 20° e 45°;
- d) Rugosidade do vento: $\rho=0,11$.

A utilização ou não das variáveis da dissertação para a elaboração dos novos modelos da tese levaram em consideração, o quão influente a variável se apresenta no estudo de Scotton (2016). Além disso, considerou-se alguns estudos topográficos realizados pelo túnel, onde o objetivo era avaliar o efeito *speed-up* no topo de morros ou taludes, para futuras instalações de pavilhões logísticos. Com estes estudos experimentais, se pode observar quais as características e variáveis que as topografias com terraplenagem apresentavam, e assim, deixar a tese com maior aplicabilidade.

Como mencionado, os modelos da primeira fase já foram produzidos e ensaiados por Scotton (2016), entretanto, como serão utilizados para comparação com os dados da tese optou-se por demonstrá-los. Os projetos dos modelos reduzidos ensaiados em túnel de vento para o modelo de seção transversal sinusoidal, ângulo de 20°, bem como as posições de medição, podem ser visualizados nas figuras 43a e 43b. As figuras diferem entre si pela dimensão na direção

transversal à incidência do vento, assim o morro da figura 43a é considerado 3D e o morro da figura 43b é considerado 2D.

a)



b)

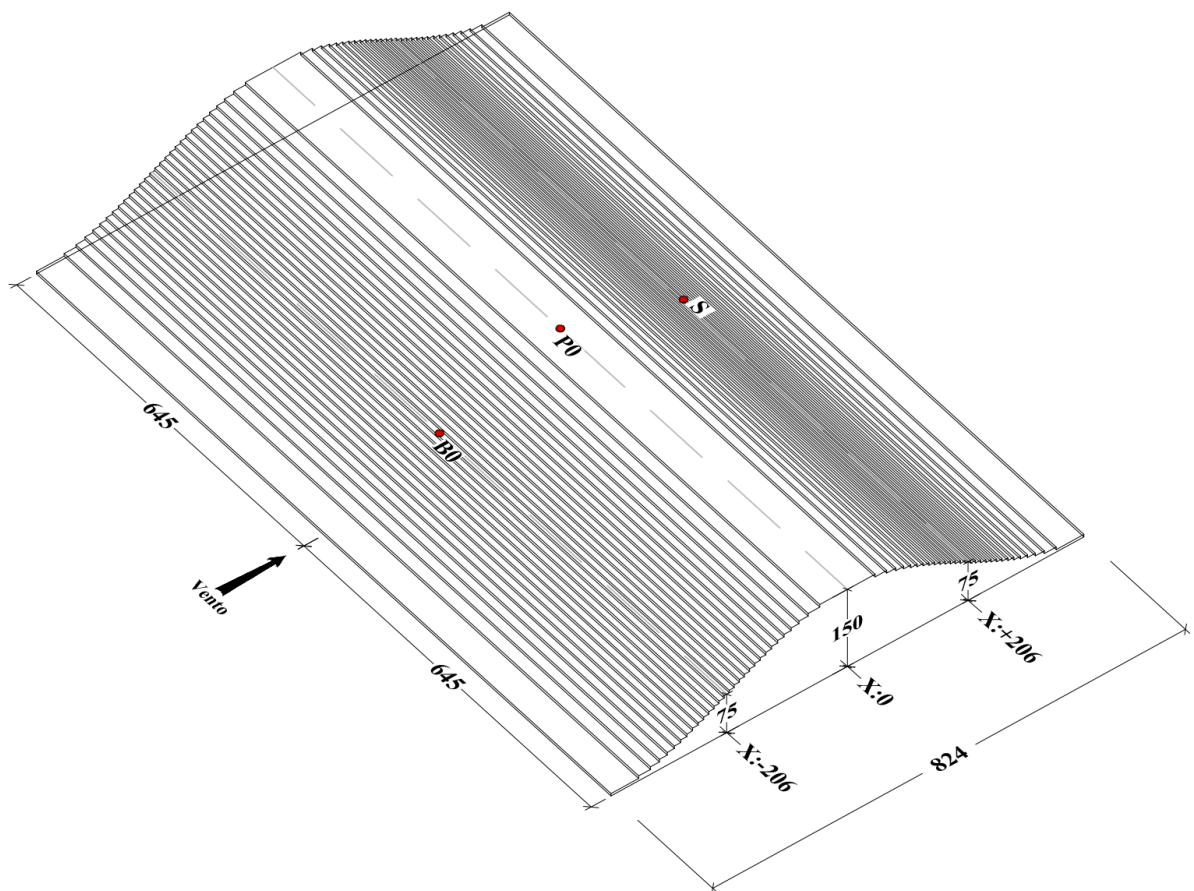
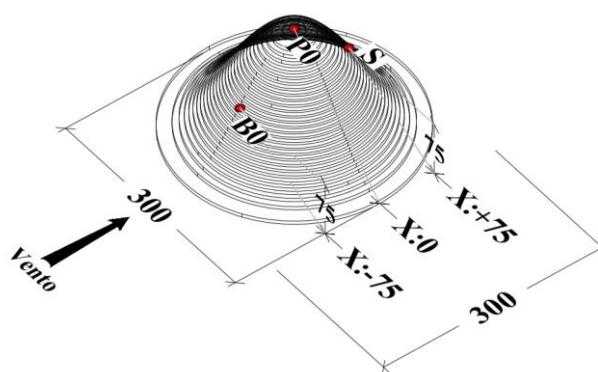


Figura 43 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais, com ângulo de 20° , 3D (a) e 2D (b), [mm]

O outro modelo sinusoidal, que foi ensaiado em túnel de vento, é o que apresenta o ângulo de 45° . Os projetos tridimensionais dos modelos reduzidos podem ser visualizados na figura 44a apresenta o morro 3D e a figura 44b um morro 2D.

a)



b)

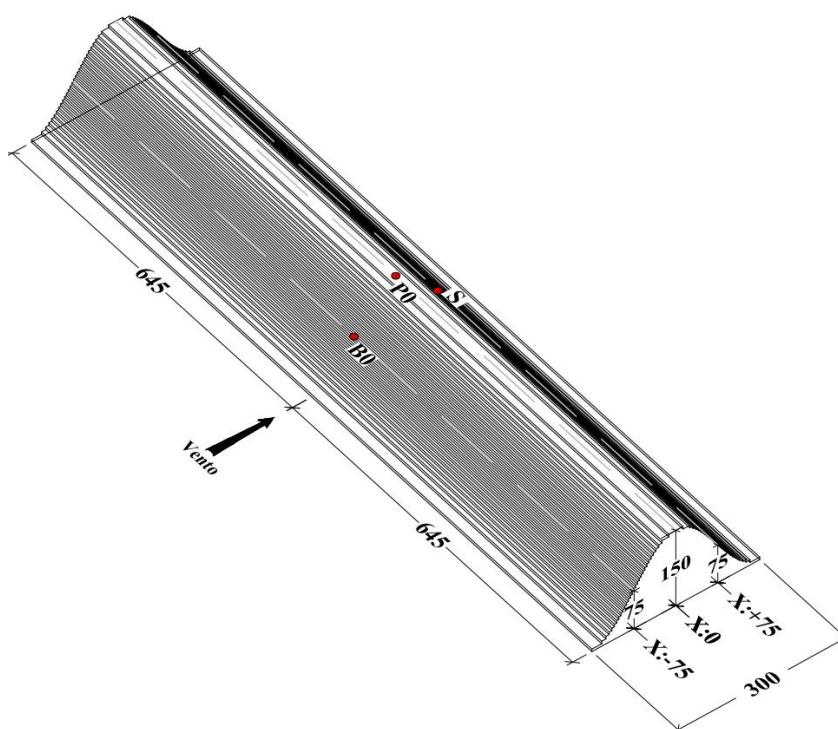
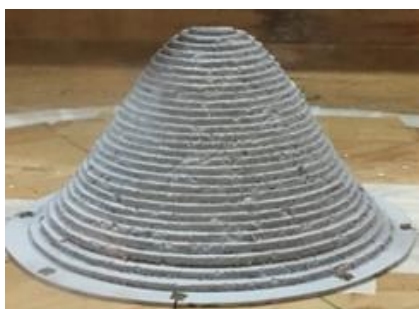


Figura 44 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais, com ângulo de 45° , 3D (a) e 2D (b), [mm]

A produção dos modelos reduzidos foi realizada na oficina disponibilizada pelo laboratório de Aerodinâmicas 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. Após

a secagem, utilizou-se massa corrida para ajustar pequenas imperfeições e para finalizar pintou-se com tinta à base de água. Os modelos reduzidos prontos para serem ensaiados no túnel são apresentados nas figuras 45a e 45b, modelo 3D e 2D, respectivamente.

a)



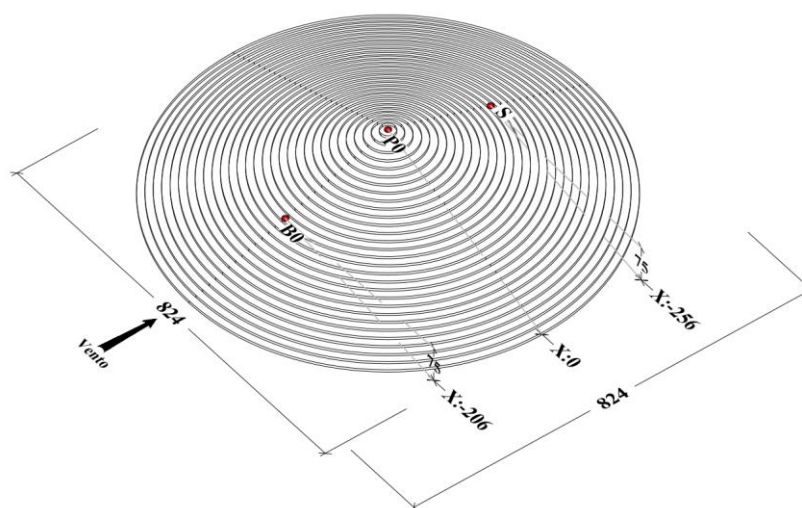
b)



Figura 45 – Modelo reduzido sinusoidal para ângulo 45° 3D (a) e 2D (b).

Os modelos reduzidos com seção transversal triangular seguiram o mesmo método de produção. O projeto tridimensional dos morros, bem como locação dos pontos ensaiados são apresentados nas figuras 46 (ângulo de 20°) e 47 (ângulo de 45°).

a)



b)

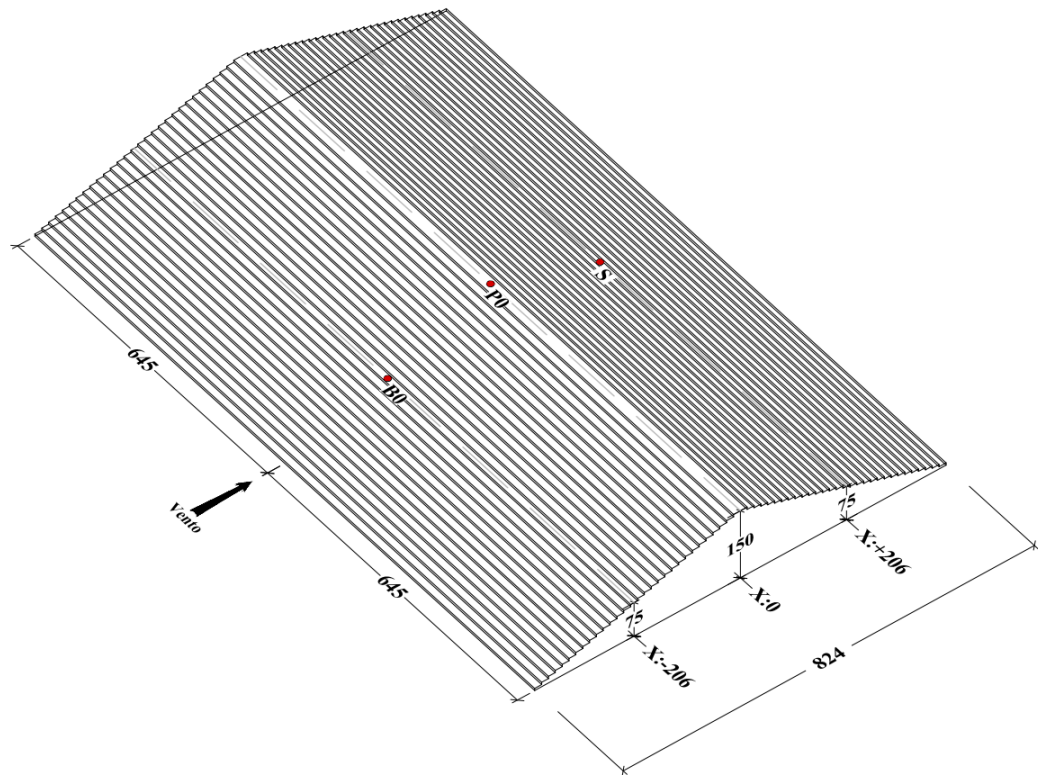
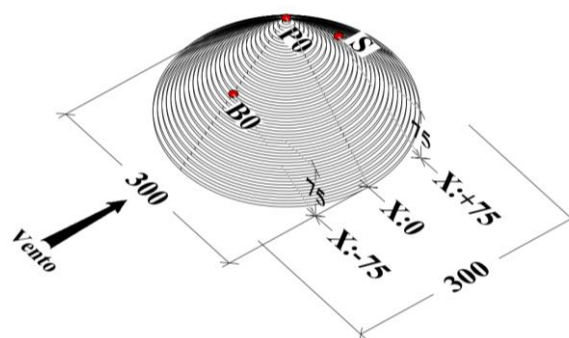


Figura 46 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares, com ângulo de 20° , 3D (a) e 2D (b), [mm]

a)



b)

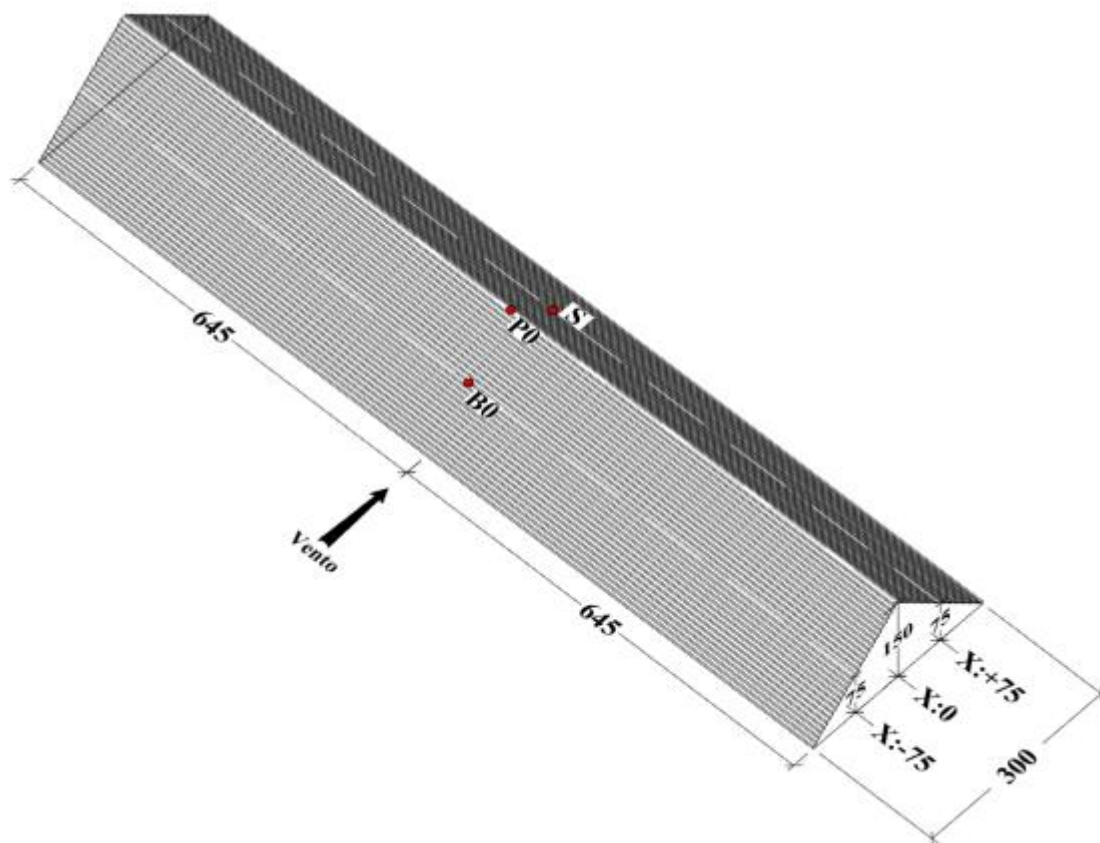


Figura 47 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares, com ângulo de 45° , 3D (a) e 2D (b), [mm]

As figuras 48a e 48b mostram os modelos produzidos para o ângulo de 45° , no interior do túnel de vento prontos para serem ensaiados.

a)



b)

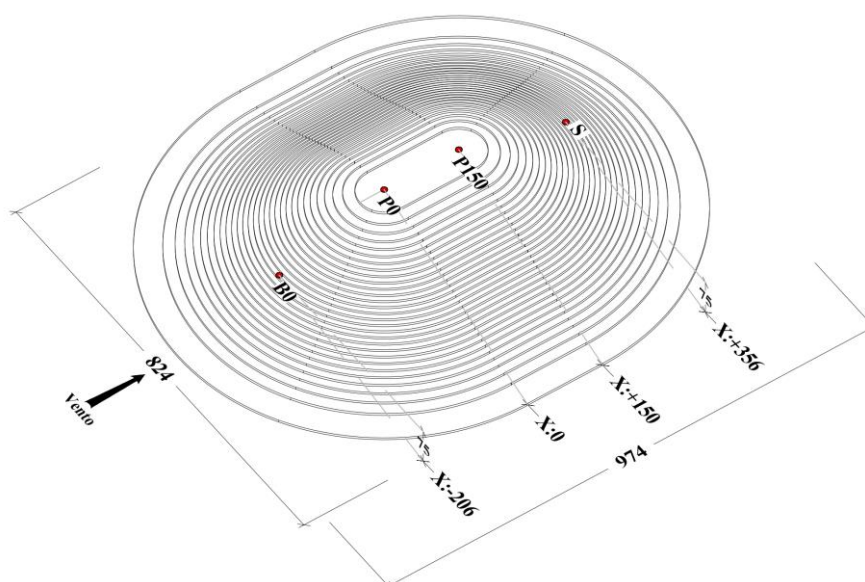


Figura 48 – Modelo reduzido triangular para ângulo 45° 3D (a) e 2D (b).

4.5.2 Segunda etapa da pesquisa

A segunda etapa contempla os modelos reduzidos com extensão do cume do morro, formando um patamar. Nesta etapa se utilizou os mesmos parâmetros, mencionados na seção 4.5.1, em relação a seção transversal, dimensionalidade e ângulo para confeccionar os modelos desta etapa. A nova variável, a qual estende o último nível do morro é função da altura do morro e são consideradas duas extensões distintas iguais a 1H e 3H, 150 mm e 450 mm, respectivamente. A figura 49 mostra o modelo sinusoidal, ângulo de 20° e extensão de 1H, modelo 3D (figura 49a) e modelo 2D (figura 49b).

a)



b)

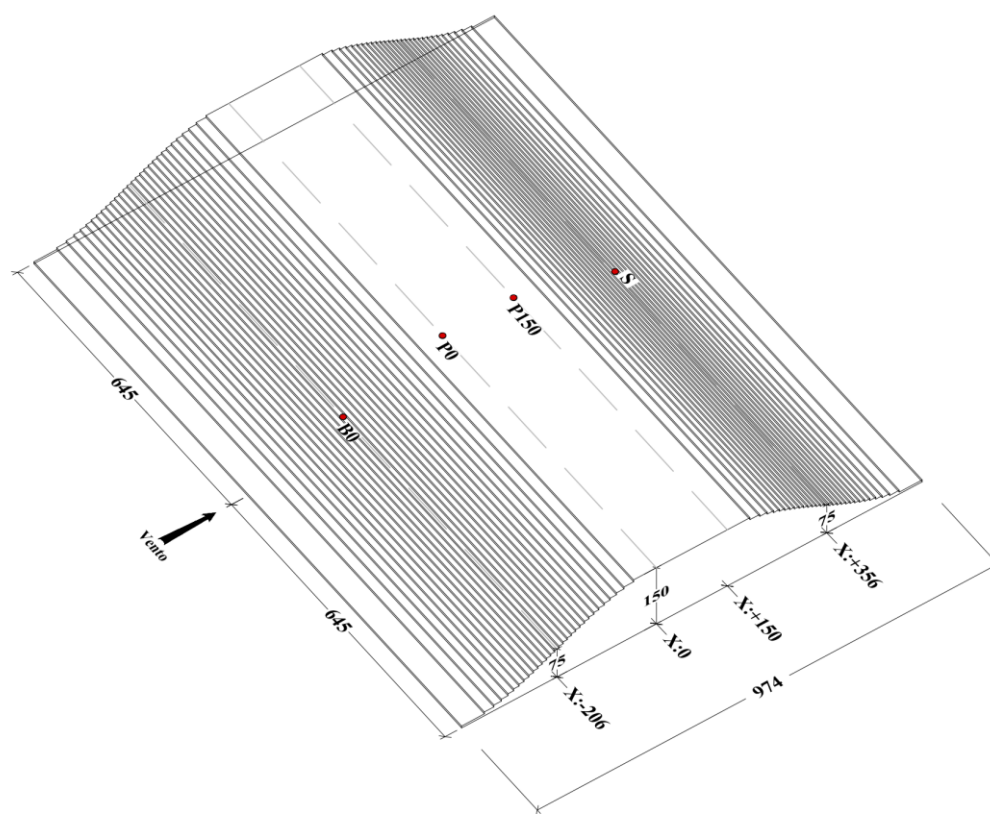
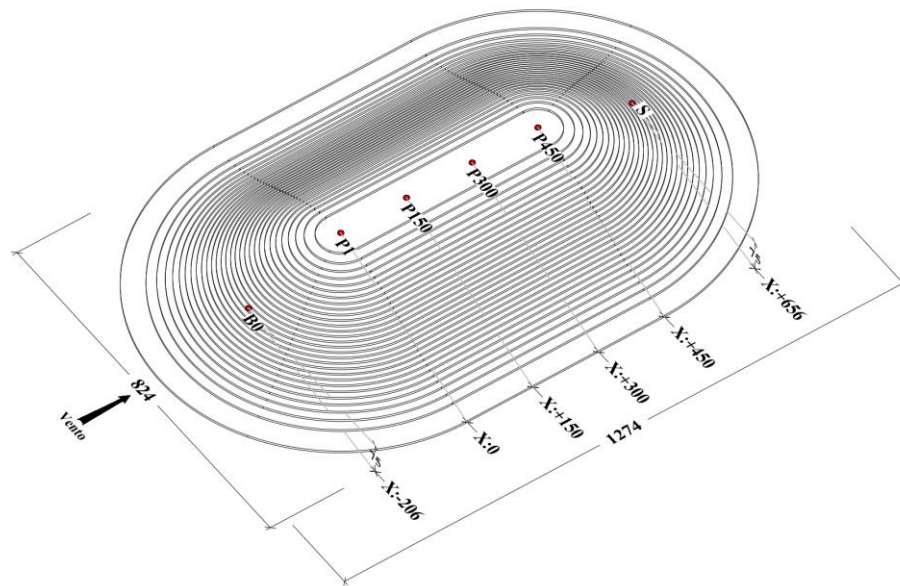


Figura 49 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 20° e extensão do cume de $1H$, [mm].

A figura 50 mostra o modelo sinusoidal, ângulo de 20° e extensão de $3H$, modelo 3D (figura 50a) e modelo 2D (figura 50b).

a)



b)

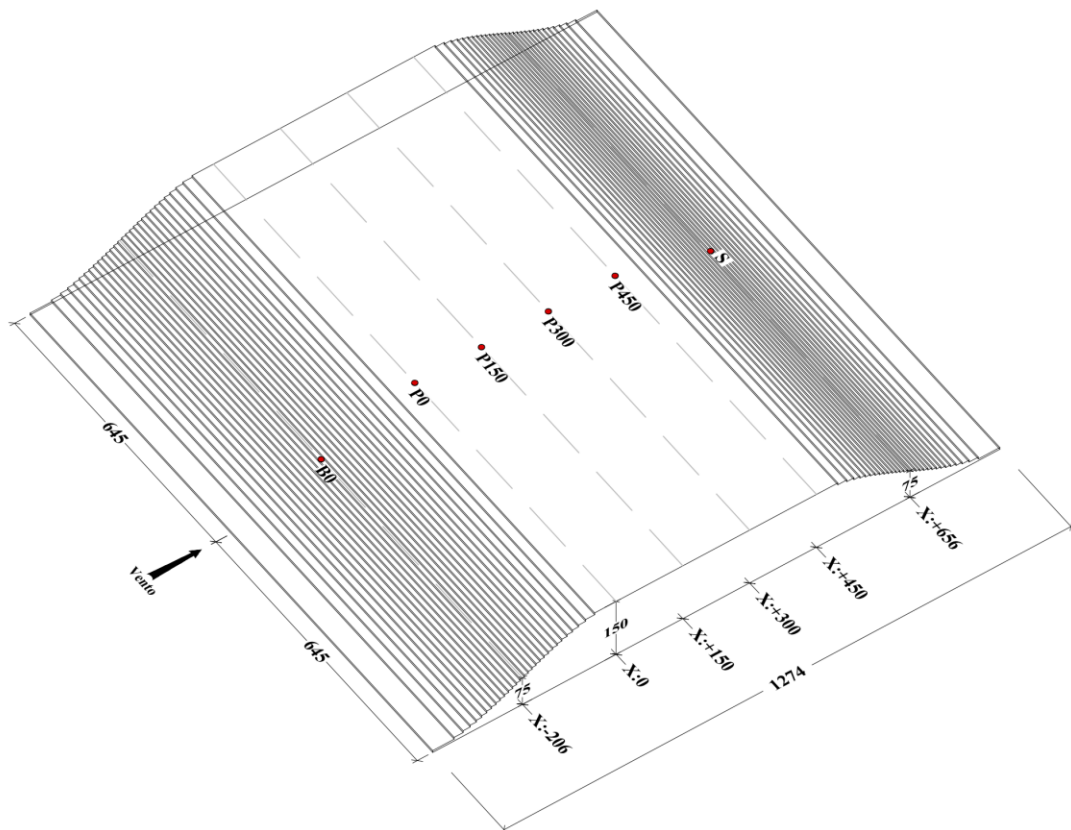
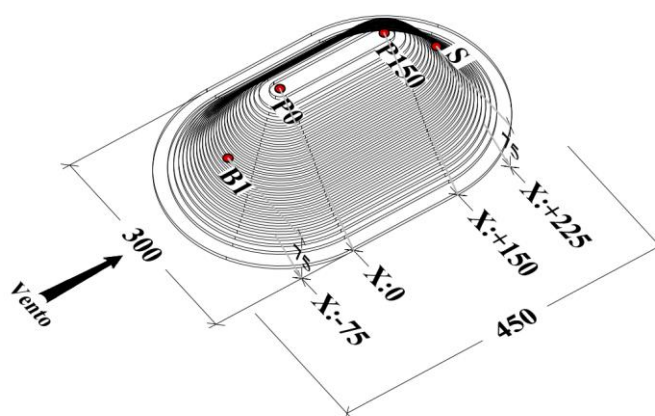


Figura 50 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 20° e extensão do cume de $3H$, [mm].

O outro modelo sinusoidal, que foi ensaiado em túnel de vento, é o que apresenta o ângulo de 45° . Os projetos tridimensionais dos modelos reduzidos podem ser visualizados na figura 51a, morro 3D, e a figura 51b um morro 2D para o morro com extensão do cume de 1H.

a)



b)

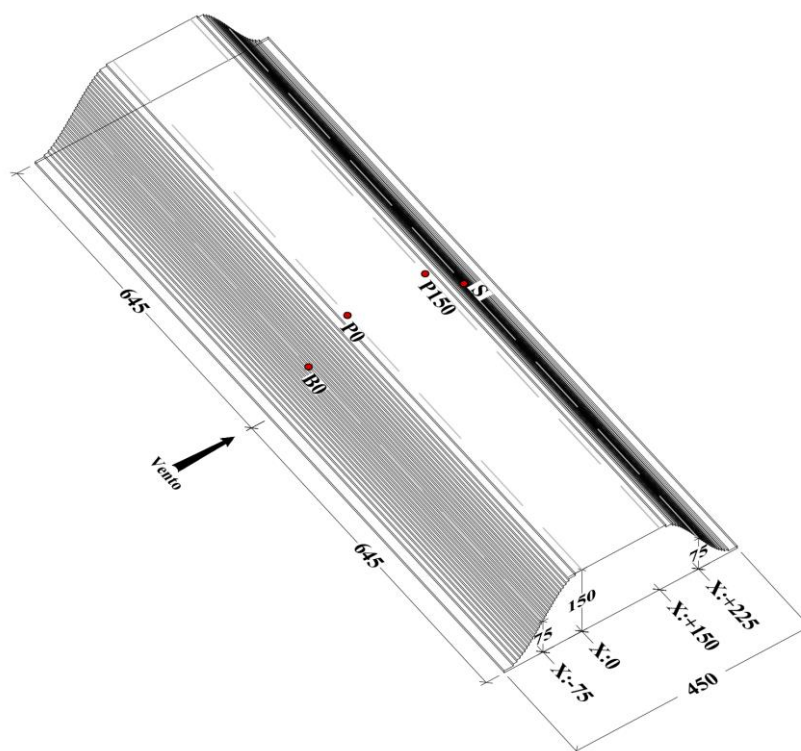
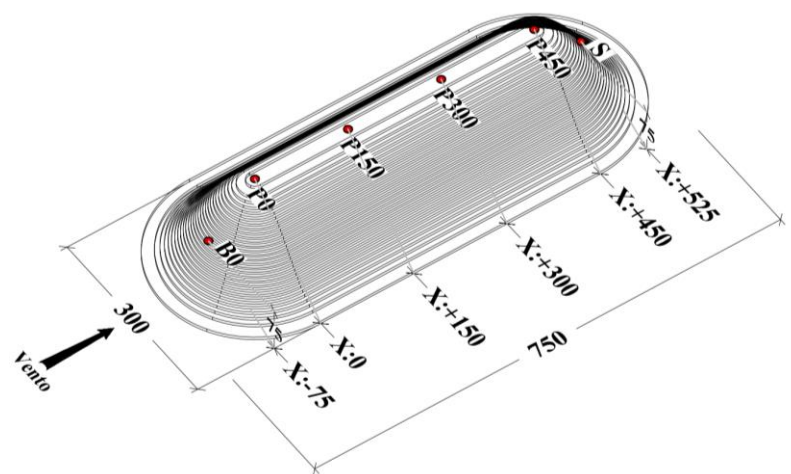


Figura 51 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de 1H, [mm].

A figura 52 mostra o modelo sinusoidal, ângulo de 45° e extensão de $3H$, modelo 3D (figura 52a) e modelo 2D (figura 52b).

a)



b)

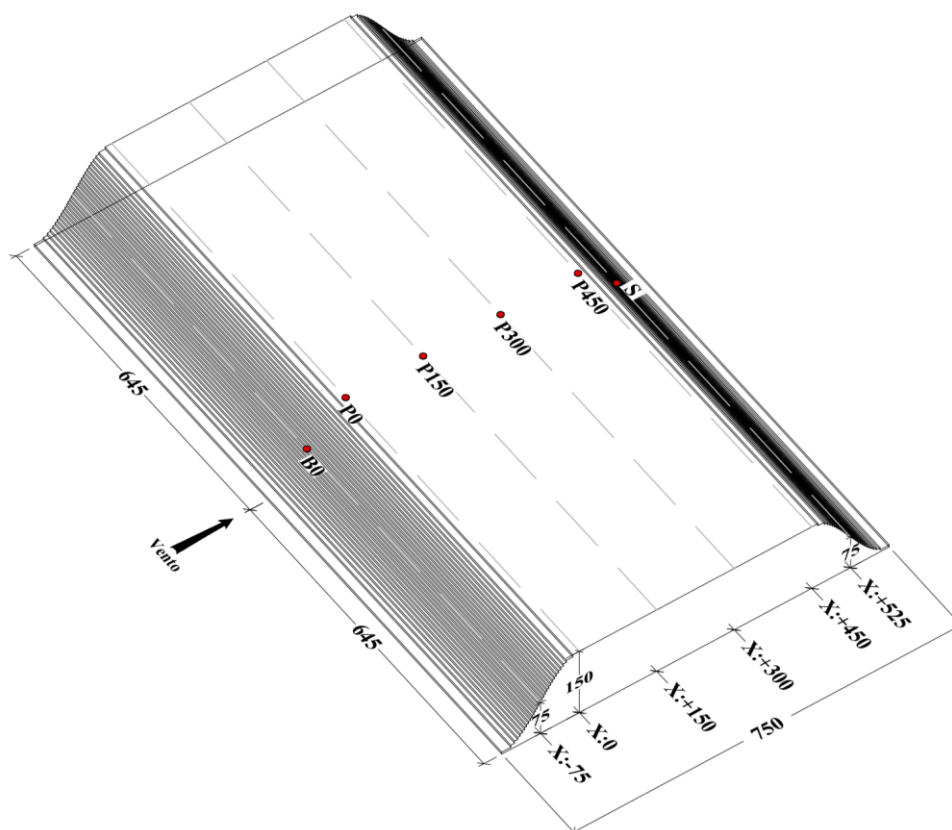


Figura 52 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos sinusoidais 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de $3H$, [mm].

As figuras 53 e 54 mostram os modelos sinusoidais, produzidos para o ângulo de 45° com extensão do cume igual a $1H$, no interior do túnel de vento prontos para serem ensaiados.



Figura 53 – Modelo reduzido sinusoidal 3D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $1H$



Figura 54 – Modelo reduzido sinusoidal 2D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $1H$

As figuras 55 e 56 mostram os modelos sinusoidais, produzidos para o ângulo de 20° com extensão do cume igual a $3H$, no interior do túnel de vento prontos para serem ensaiados.



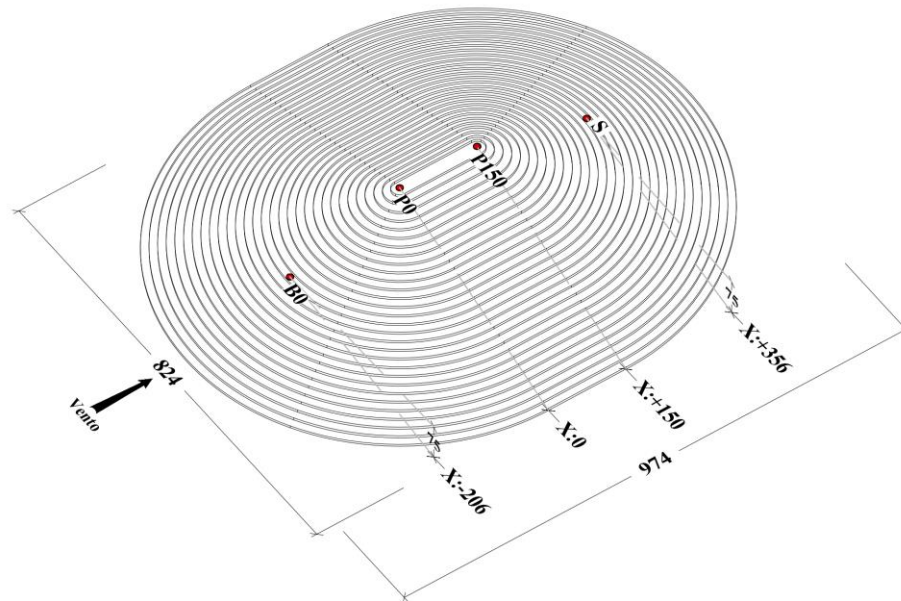
Figura 55 – Modelo reduzido sinusoidal 3D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a $3H$



Figura 56 – Modelo reduzido sinusoidal 2D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a 3H.

Os modelos reduzidos com seção transversal triangular seguiram o mesmo método de produção. O projeto tridimensional dos morros, bem como locação dos pontos ensaiados são apresentados nas figuras respectivas ao o modelo triangular, ângulo de 20° e extensão de 1H e 3H. As figuras 57a e 57b mostram o projeto tridimensional do modelo 3D e modelo 2D, respectivamente, para o modelo com extensão do cume igual a 1H.

a)



b)

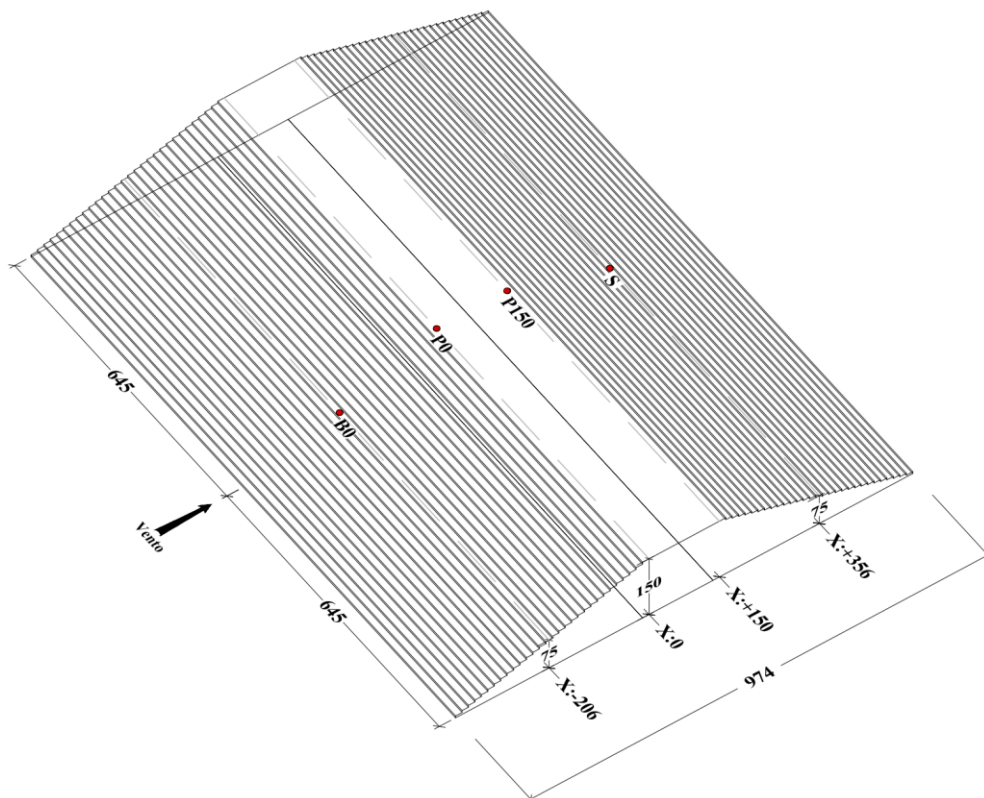
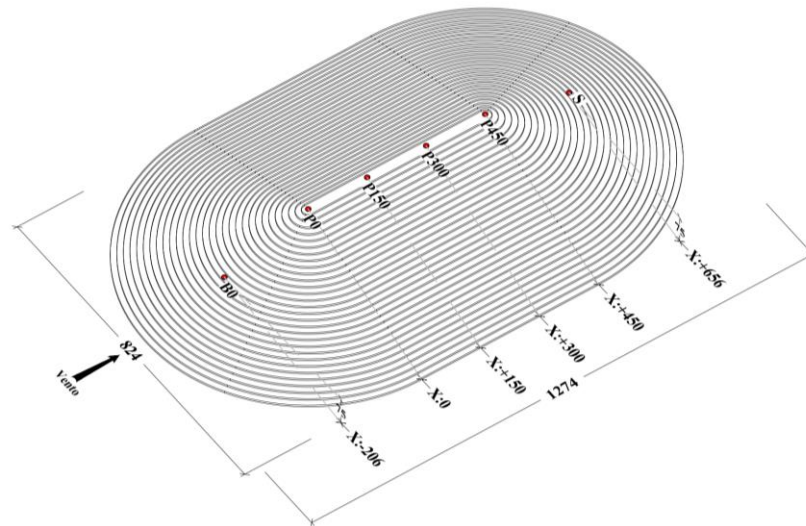


Figura 57 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 20° e extensão do cume de 1H, [mm].

A figura 58 mostra o modelo triangular, ângulo de 20° e extensão de $3H$, modelo 3D (figura 58a) e modelo 2D (figura 58b).

a)



b)

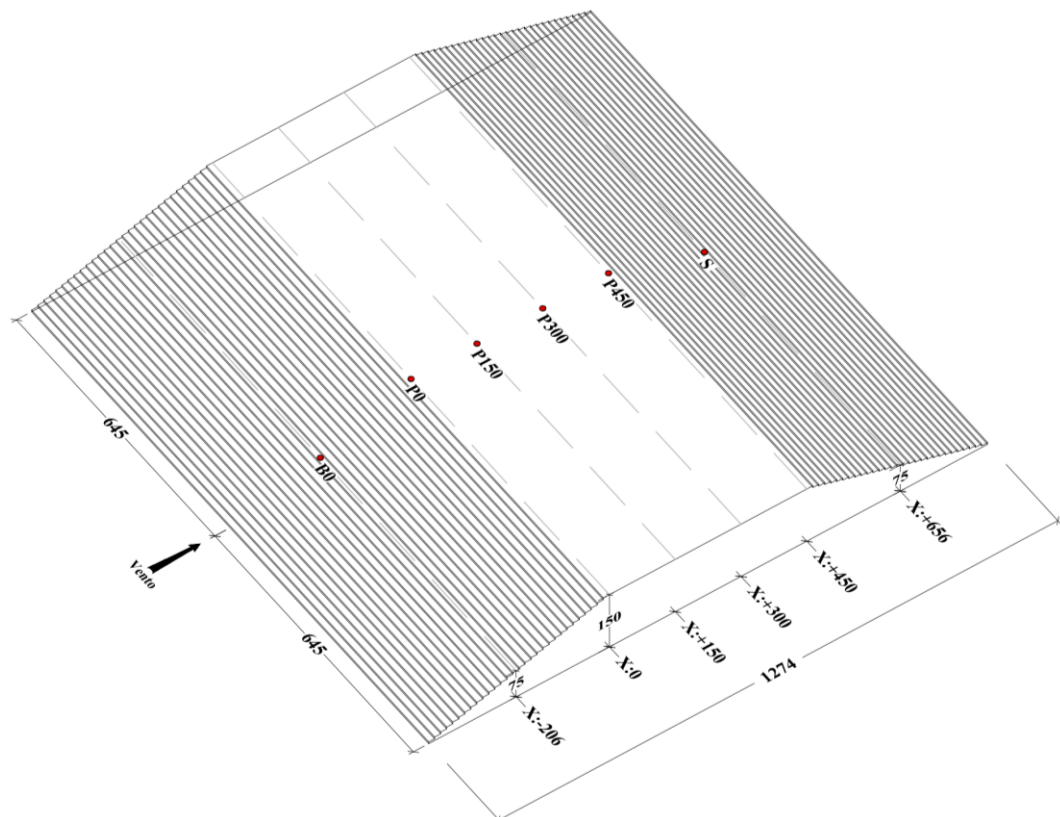
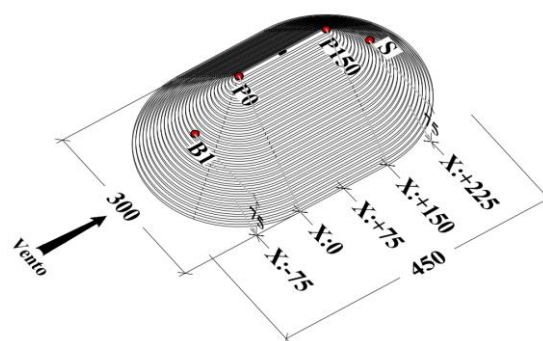


Figura 58 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 20° e extensão do cume de $3H$, [mm].

O outro modelo triangular, que foi ensaiado em túnel de vento, é o que apresenta o ângulo de 45° . Os projetos tridimensionais dos modelos reduzidos podem ser visualizados na figura 59a, morro 3D, e a figura 59b um morro 2D para o morro com extensão do cume de 1H.

a)



b)

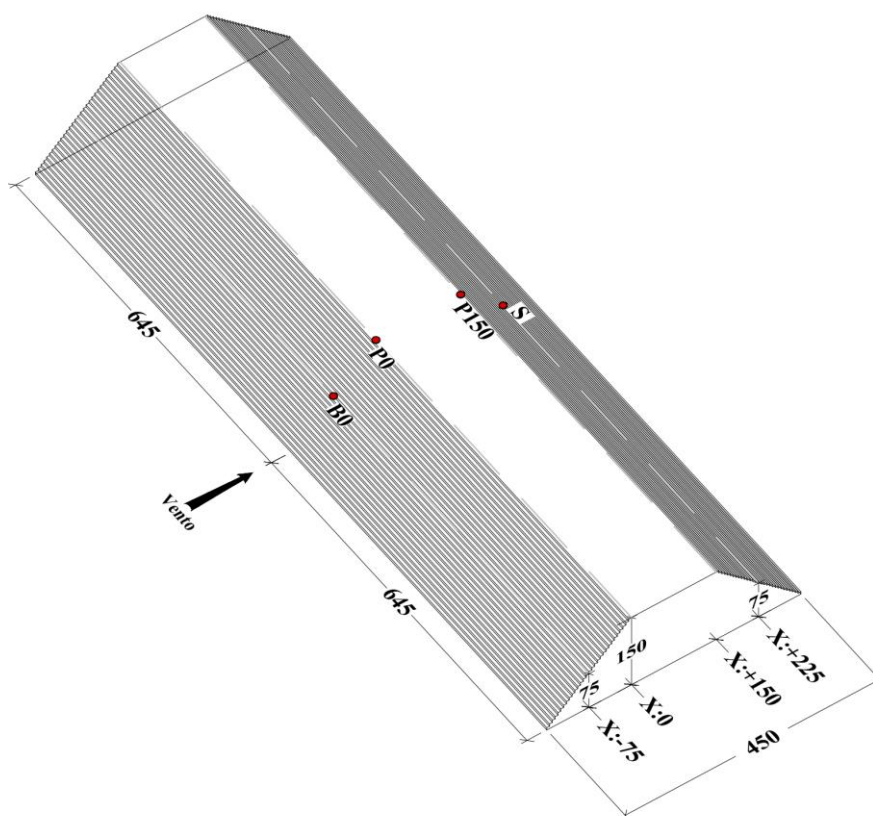
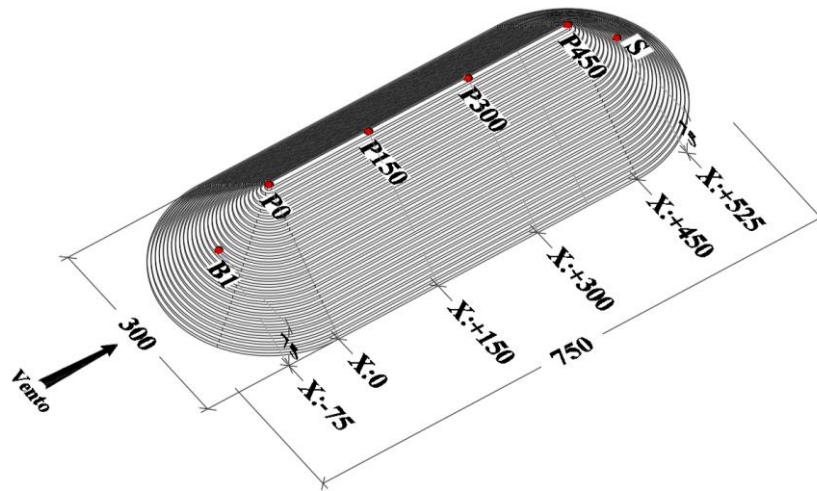


Figura 59 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de 1H, [mm].

A figura 60 mostra o modelo triangular, ângulo de 45° e extensão de $3H$, modelo 3D (figura 60a) e modelo 2D (figura 60b).

a)



b)

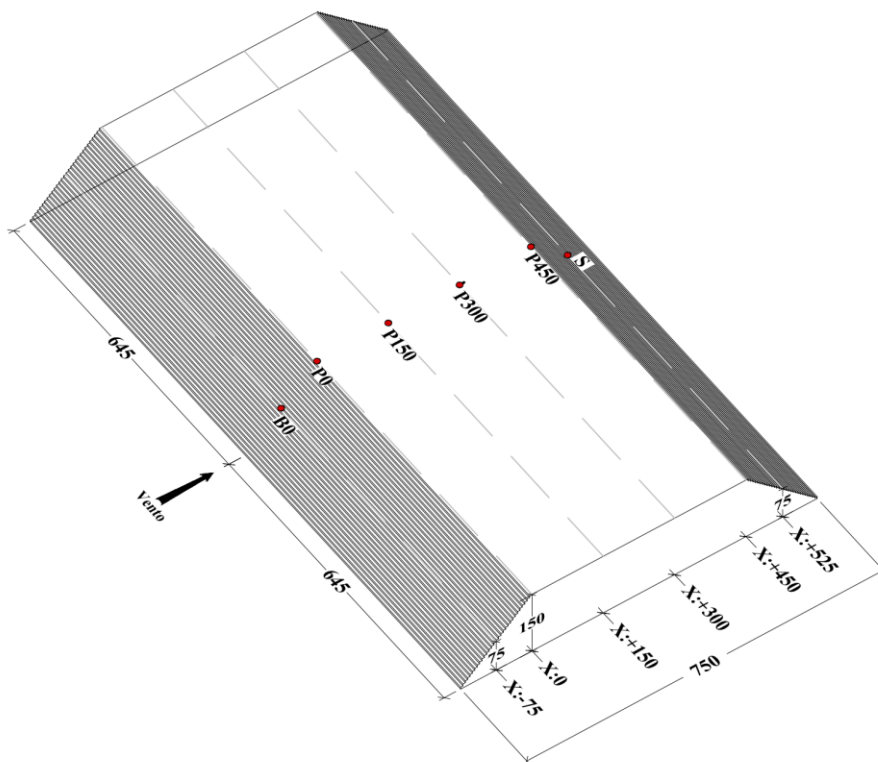


Figura 60 – Projeto tridimensional dos modelos reduzidos triangulares 3D (a) e 2D (b), com ângulo de 45° e extensão do cume de $3H$, [mm].

As figuras 61 e 62 mostram os modelos triangulares, produzidos para o ângulo de 45° com extensão do cume igual a $1H$, no interior do túnel de vento prontos para serem ensaiados.

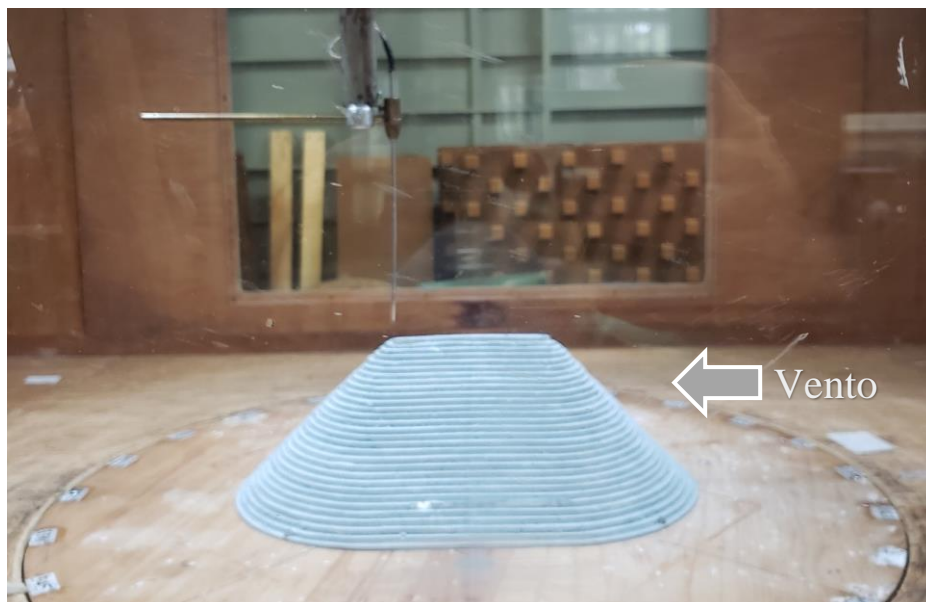


Figura 61 – Modelo reduzido triangular 3D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $1H$.



Figura 62 – Modelo reduzido triangular 2D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $1H$.

As figuras 63 e 64 mostram os modelos triangulares, produzidos para o ângulo de 45° com extensão do cume igual a $3H$, no interior do túnel de vento prontos para serem ensaiados.



Figura 63 – Modelo reduzido triangular 3D para ângulo 45° , com extensão do cume igual a $3H$.

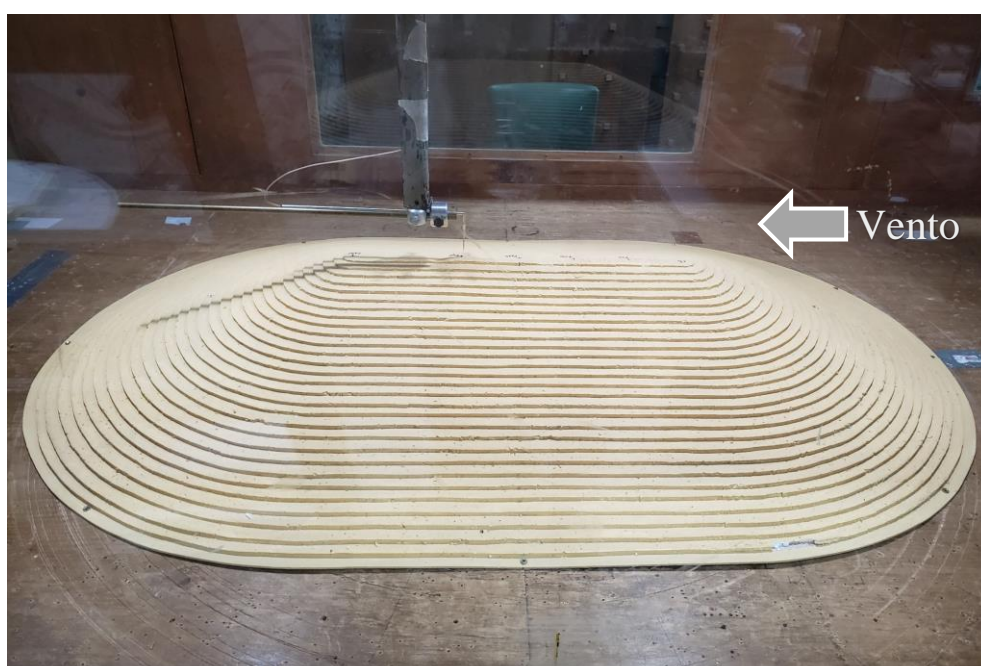


Figura 64 – Modelo reduzido triangular 3D para ângulo 20° , com extensão do cume igual a $3H$.

4.5.3 Terceira etapa da pesquisa

A terceira etapa da pesquisa contempla os modelos reduzidos de taludes. Estes modelos possuem patamares intermediários a barlavento e apresentam o patamar superior prolongado em $4H$, ou seja, 600 mm. Nesta etapa os parâmetros utilizados para a variável ângulo foi de 20° e 45° . Em relação as variáveis seção transversal e dimensão os modelos reduzidos são triangulares 2D, os quais foram escolhidos pois esta etapa da pesquisa visa reproduzir taludes reais em escala reduzida.

A nova variável, a qual introduz patamares intermediários a barlavento do talude é função da altura total da topografia; e são consideradas duas extensões distintas iguais a $0,5H$ e $1H$, 75 mm e 150 mm, respectivamente. As figuras 65 a 68 apresentam o modelo triangular 2D com ângulo de 20° , com 1 patamar intermediário a barlavento igual a $0,5H$, com 2 patamares intermediários a barlavento igual a $0,5H$, com 1 patamar intermediário a barlavento igual a $1H$, com 2 patamares intermediários a barlavento igual a $1H$, respectivamente.

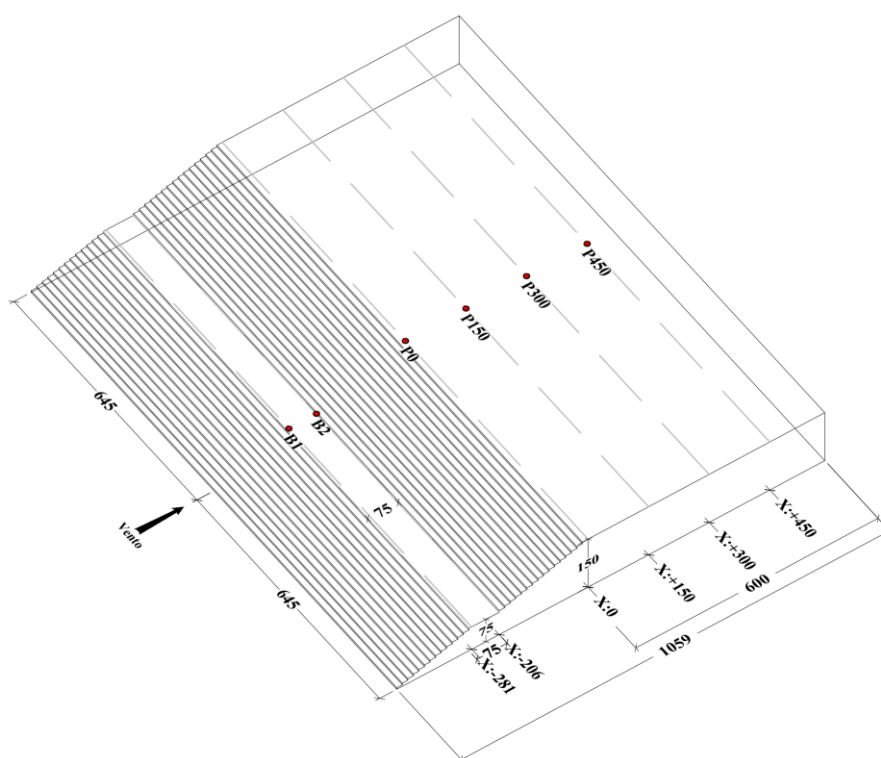


Figura 65 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 1 patamar intermediário de $0,5H$, [mm].

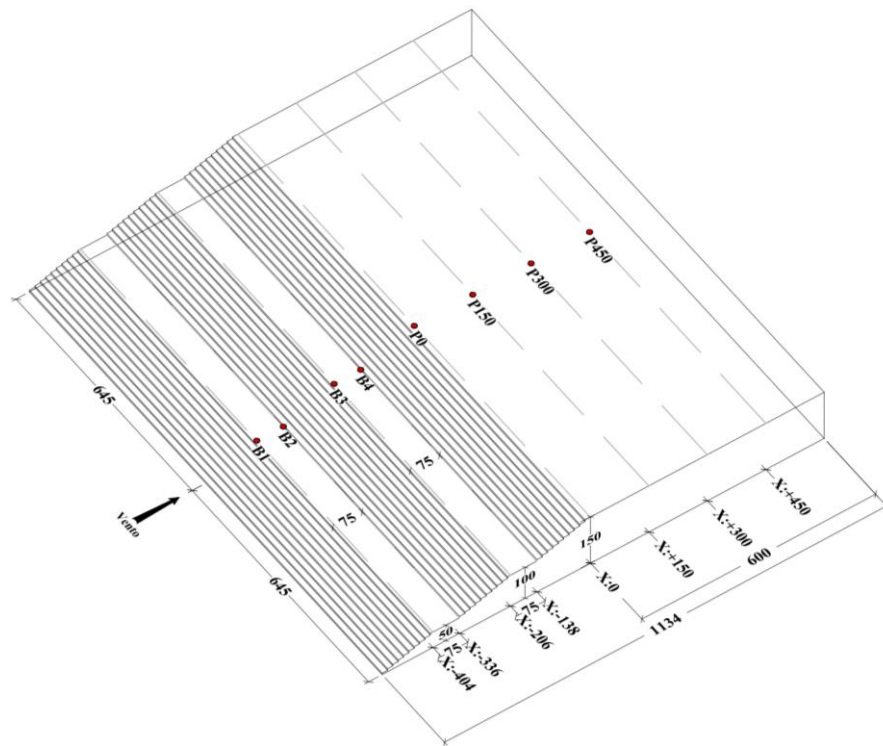


Figura 66 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 2 patamares intermediários de $0,5H$, [mm].

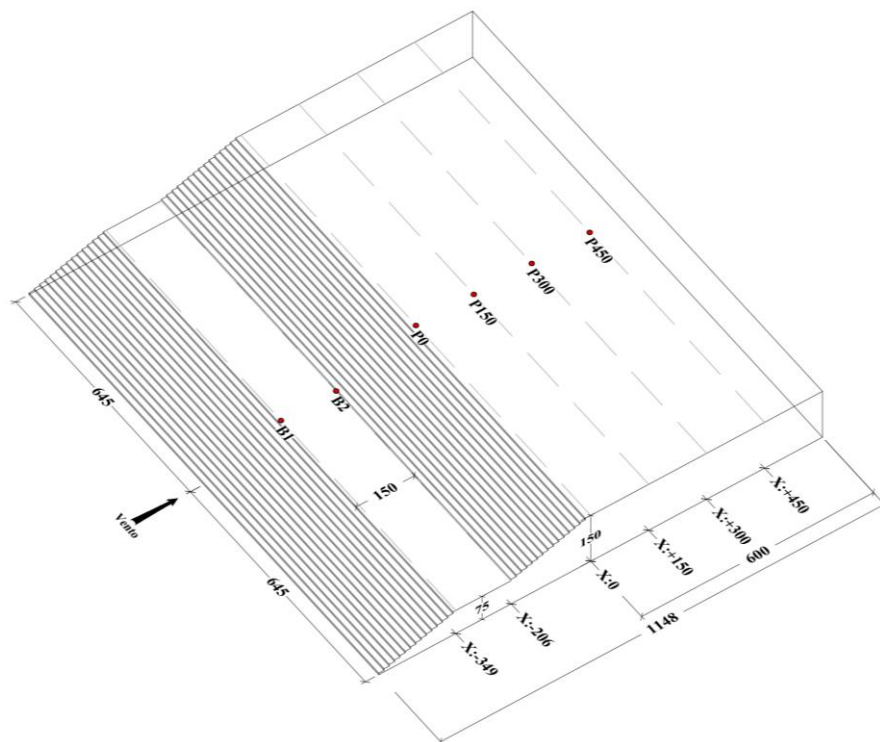


Figura 67 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 1 patamar intermediário de $1H$, [mm].

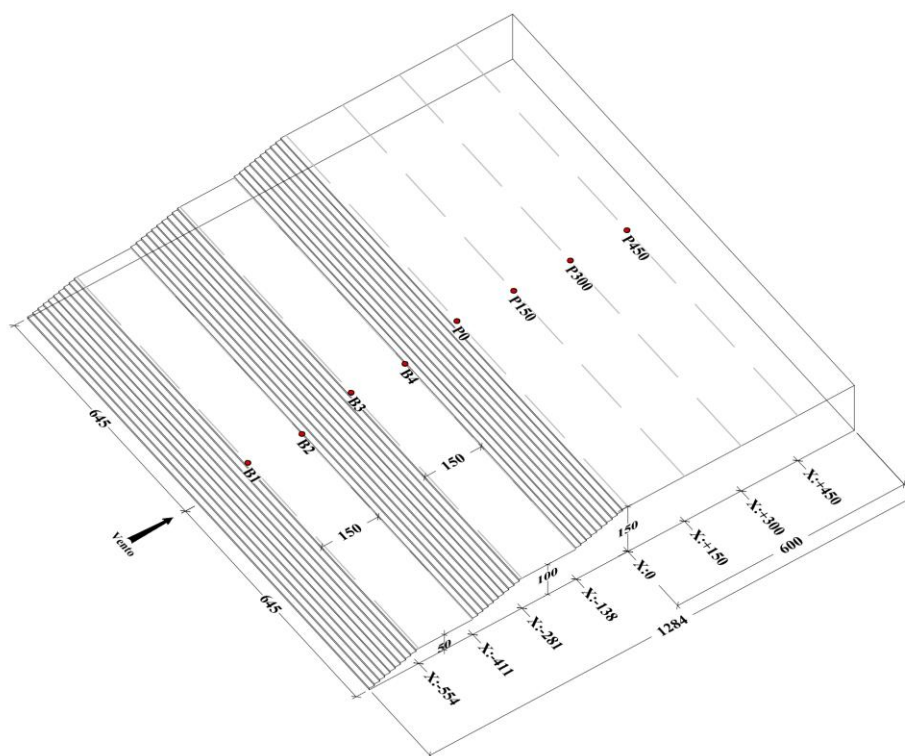


Figura 68 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 20° , com 2 patamares intermediários de $1H$, [mm].

As figuras 69 a 72 apresentam o modelo triangular 2D com ângulo de 45° , com 1 patamar intermediário a barlavento igual a $0,5H$, com 2 patamares intermediários a barlavento igual a $0,5H$, com 1 patamar intermediário a barlavento igual a $1H$, com 2 patamares intermediários a barlavento igual a $1H$, respectivamente.

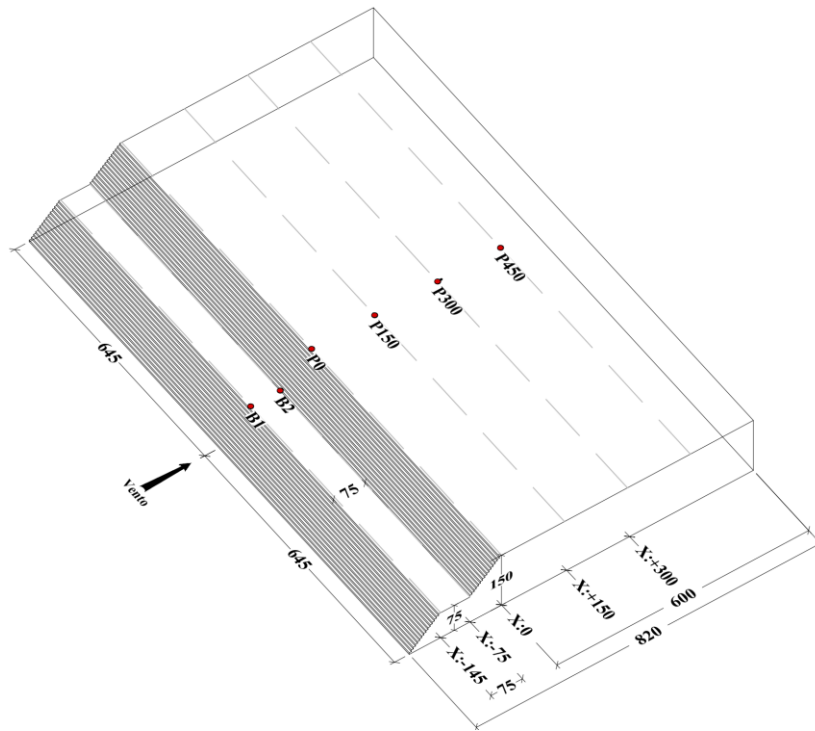


Figura 69 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45° , com 1 patamar intermediário de $0,5H$, [mm].

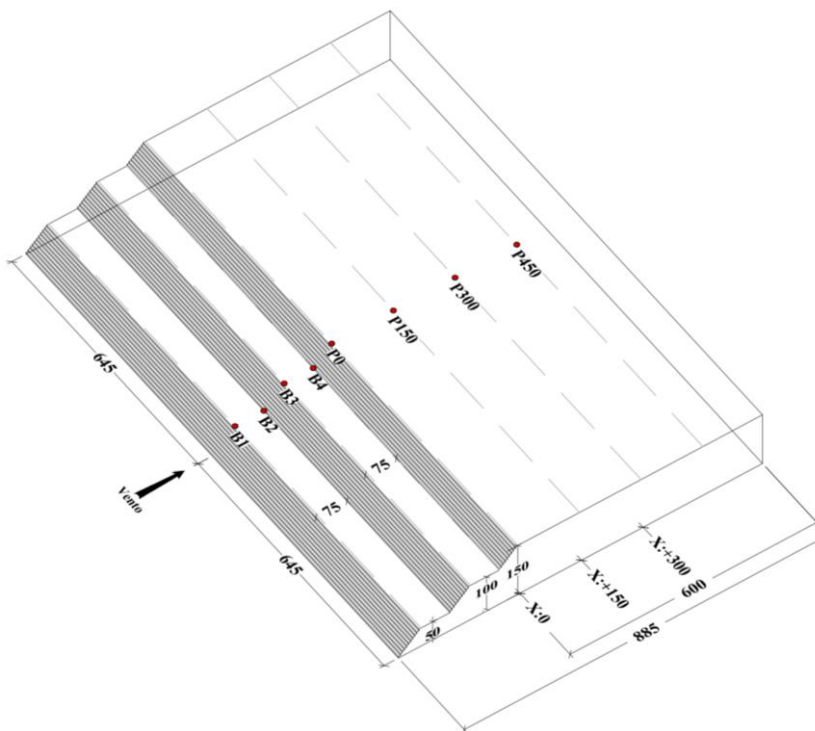


Figura 70 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45° , com 2 patamares intermediários de $0,5H$, [mm].

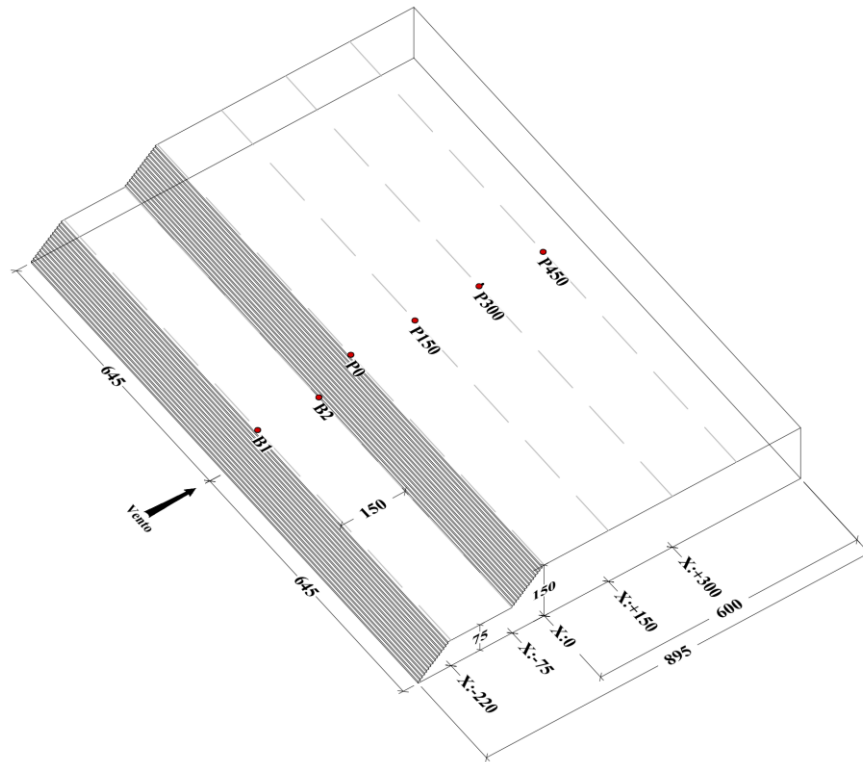


Figura 71 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45°, com 1 patamar intermediário de 1H, [mm].

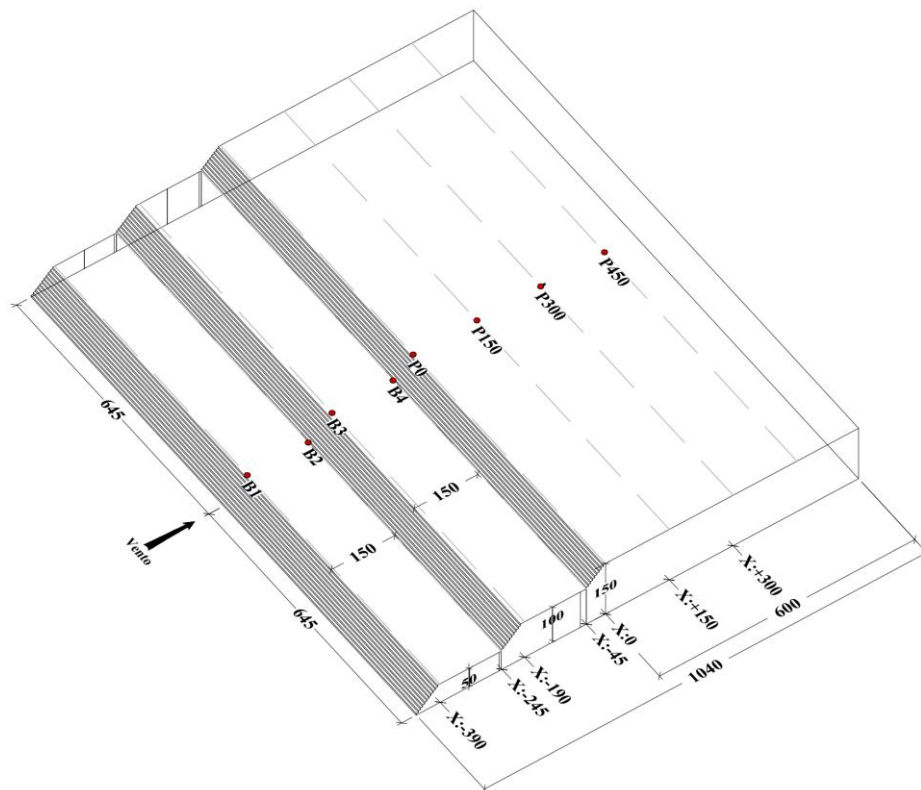


Figura 72 – Projeto tridimensional do modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45°, com 2 patamares intermediários de 1H, [mm].

a)



b)

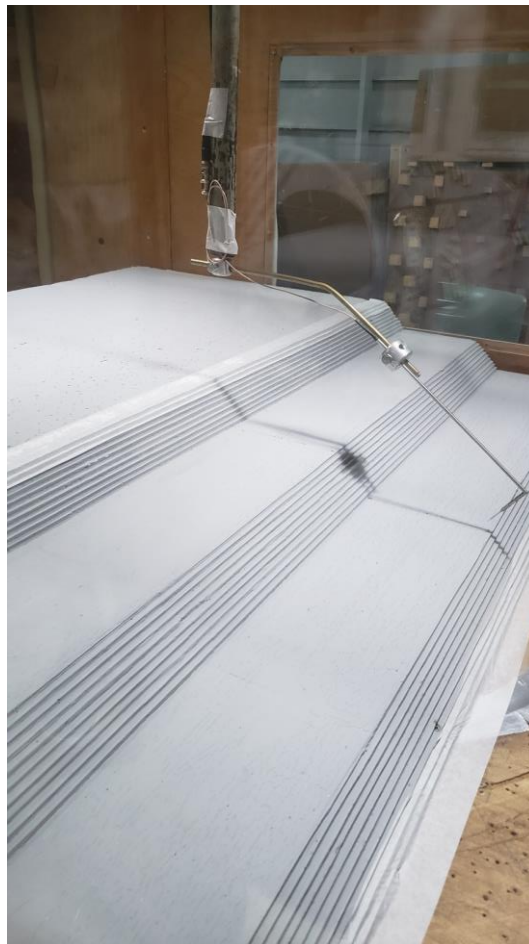


Figura 73 – Modelo reduzido triangular 2D e ângulo de 45° , com 2 patamares intermediários de $0,5H$ (a) e $1H$ (b).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em túnel de vento, as comparações com as normas abordadas e, conjuntamente, será realizada a análise dos resultados e discussões. 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). O modelo analítico de Jackson e Hunt e o modelo proposto por Lemelin et al. – LSD não serão abordados, porém são métodos importantes pois servem de embasamento teórico para as normas.

Os modelos experimentais foram divididos em três, conforme as etapas de execução, e são definidas como:

- a) Primeira etapa: morros sem extensão do cume e sem patamares intermediários a barlavento;
- b) Segunda etapa: morros com extensão do cume;
- c) Terceira etapa: taludes com patamares intermediários.

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos em ensaios experimentais em túnel de vento são demonstrados nos próximos itens conforme as etapas definidas no capítulo 4. Os gráficos apresentados neste capítulo são normalizados, no eixo vertical as cotas estão normalizadas pela altura dos modelos que é 150 mm. No eixo horizontal as velocidades foram normalizadas pela velocidade na cota 450 mm, sendo esta considerada a velocidade não perturbada pelo escoamento.

5.1.1 Resultados experimentais e análises para a primeira etapa: morros sem extensão do cume e sem patamares intermediários a barlavento

Os resultados experimentais desta etapa da pesquisa abordam os morros sem extensões do cume e sem patamares intermediários a barlavento. Estes modelos, como já mencionado, foram ensaiados na dissertação de Scotton (2016) e servem como referência. Visto que, na segunda e terceira etapas foram realizadas modificações nos morros, que alteraram a seção transversal e conseqüente o escoamento do vento ao transpor estes modelos. Para esta etapa da pesquisa as variáveis são:

- a) seção transversal: sinusoidal e triangular;

- b) dimensionalidade: 2D e 3D;
 c) ângulo: 20° e 45°.

O comportamento dos perfis de velocidades do vento ao transpor morros pode ser melhor compreendido pelas figuras 74 e 75. Estas apresentam, de forma compilada, os perfis para as três posições analisadas: B0, P0 e S, para ambas seções transversais sinusoidal, em preto, e triangular, em vermelho, para o ângulo de 20° os perfis são apresentados na figura 74 e para o ângulo de 45° são apresentados na figura 75. Nos gráficos os nomes são apresentados completos com todas as variáveis descritas na sequência: seção transversal (S ou T), dimensionalidade (2D ou 3D), vento 0,11 (11), ângulo (20° ou 45°), extensão do cume ou não como é o caso (P0H), presença de patamares intermediários ou não como é o caso (I0C000). Por fim, a última variável apresentada é a posição de medição (B0, P0, S). No texto está escrito de maneira simplificada quando as variáveis são mantidas.

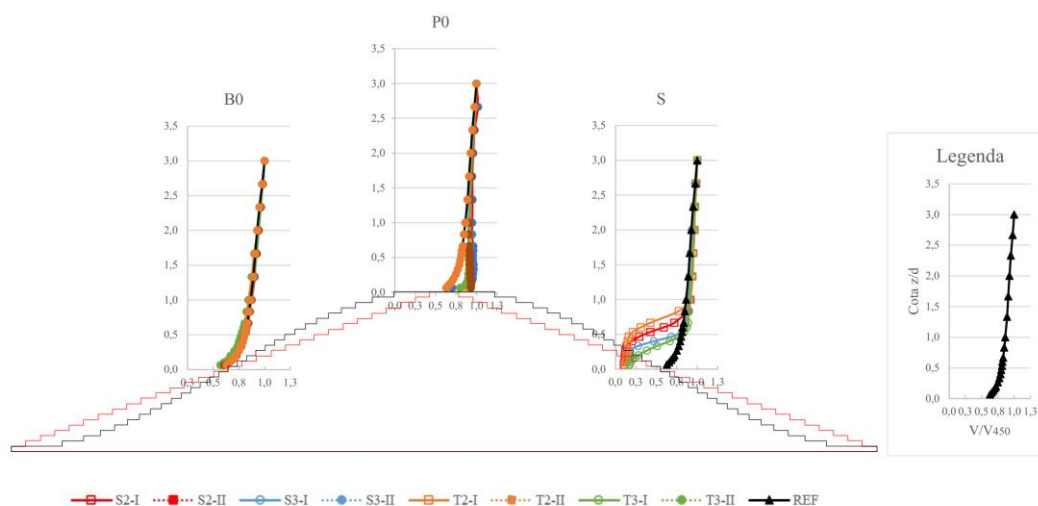


Figura 74 – Resultados experimentais para os morros da primeira etapa com ângulo de 20°.

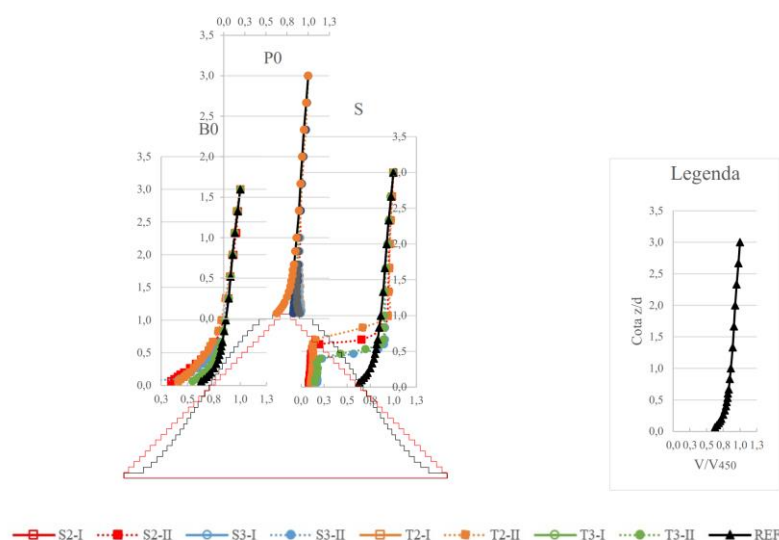


Figura 75 – Resultados experimentais para os morros da primeira etapa com ângulo de 45°.

Nesta primeira análise, de uma forma geral, os morros com ângulo de 20° tendem a interferir menos no escoamento do vento que os morros com ângulo de 45° e, conseqüentemente, no comportamento do perfil de velocidades do vento. Fica evidente, principalmente, para o ângulo de 20° e para a posição de análise B0, onde os perfis de velocidades do vento são muito próximos a referência. Diferentemente, para os morros com ângulo de 45°, os perfis sofreram maior influência devido a maior inclinação do morro, apresentando valores de velocidades para os perfis menores que o perfil referência. Nesta região, há a formação de uma região de recirculação, que influencia no perfil de velocidades. A barlavento, pode ou não ocorrer a recirculação do escoamento, pois este depende das características do escoamento, além da influência do ângulo do morro ou talude.

Na posição de análise P0, que é cume do morro, o efeito *speed-up*, que consiste no aumento das velocidades mais próximas ao solo, é bem definido e ocorre em todas as variações estudadas. Para a posição S, localizada a sotavento dos morros, em todas variações estudadas pode ser observado o efeito da formação da esteira, que é definida por velocidades muito baixas e alta turbulência. Observando as figuras 74 e 75, pode-se concluir que o comportamento dos perfis de velocidades a barlavento, cume e sotavento, corrobora com a afirmação de Holmes (2001).

A análise detalhada dos perfis de velocidades do vento e as comparações entre as variáveis é fundamental para entender como cada variável influencia no perfil de velocidades do vento. Como cada variável pode interferir de modo distinto em cada posição de análise, para esta fase da pesquisa se optou por assim dividir a análise: B0, P0 e S.

5.1.1.1 Análise de resultados para a primeira etapa da pesquisa: posição B0

A figura 76 apresenta os resultados experimentais obtidos apenas para a posição de análise B0, localizada a barlavento dos morros. Para todas as combinações entre dimensionalidade, ângulo e seção transversal, os perfis de velocidade apresentaram decréscimos de velocidades em relação ao perfil referência. Para os modelos sinusoidais as maiores variações foram: -8%, -45%, -9% e -36%, referentes aos modelos S2-I-20, S2-II, S3-I e S3-II, respectivamente. Para os modelos triangulares as maiores variações foram: -9%, -34%, -3% e -13%, referentes aos modelos T2-I, T2-II, T3-I e T3-II, respectivamente.

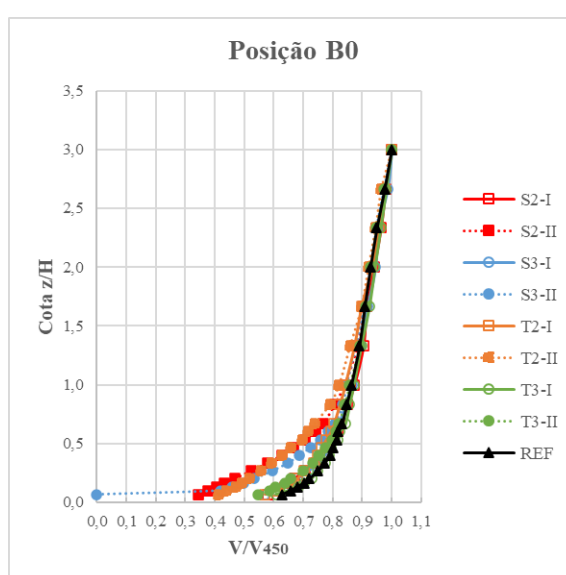


Figura 76 – Resultados experimentais para os morros da primeira etapa, posição de análise B0.

Os resultados apresentados corroboram com os estudos de Pearse et al. (1981), que observou reduções entre 0,5 a 1,0 nas velocidades, ou seja, as reduções chegaram a 50% em relação a referência. Quanto maior a razão de aspecto H/L maior era a interferência no perfil de velocidades, implicando em velocidades menores.

Na região a barlavento, onde está localizado o ponto B0, nem sempre as medições de velocidades são menores que as velocidades do perfil de referência. Holmes (2001) salienta que há uma diminuição das velocidades, entretanto, há um ponto ainda a barlavento onde as velocidades começam a aumentar gradativamente até chegar no cume, onde se tem as maiores velocidades. Na figura 9, do estudo de Menorey et al. (1976), um ponto locado antes da meia altura do morro ($H/2$) as velocidades são menores que a referência e em outro ponto, ligeiramente após a meia altura, observa-se a transição para velocidades maiores que a referência.

Nota-se que, para o ângulo de 20° nem todos os modelos apresentaram significativas mudanças no perfil de velocidades. Como por exemplo, o caso do modelo T3-I, que apresentou uma redução de apenas 3%, em relação ao perfil referência, e em algumas houve aumento de velocidade. Quanto ao ângulo de 45° , este por ser mais íngreme influenciou significativamente para que ocorressem estas reduções a barlavento, chegando em reduções 45%. A figura 77 (a) até (d) apresenta os resultados comparativos entre os ângulos.

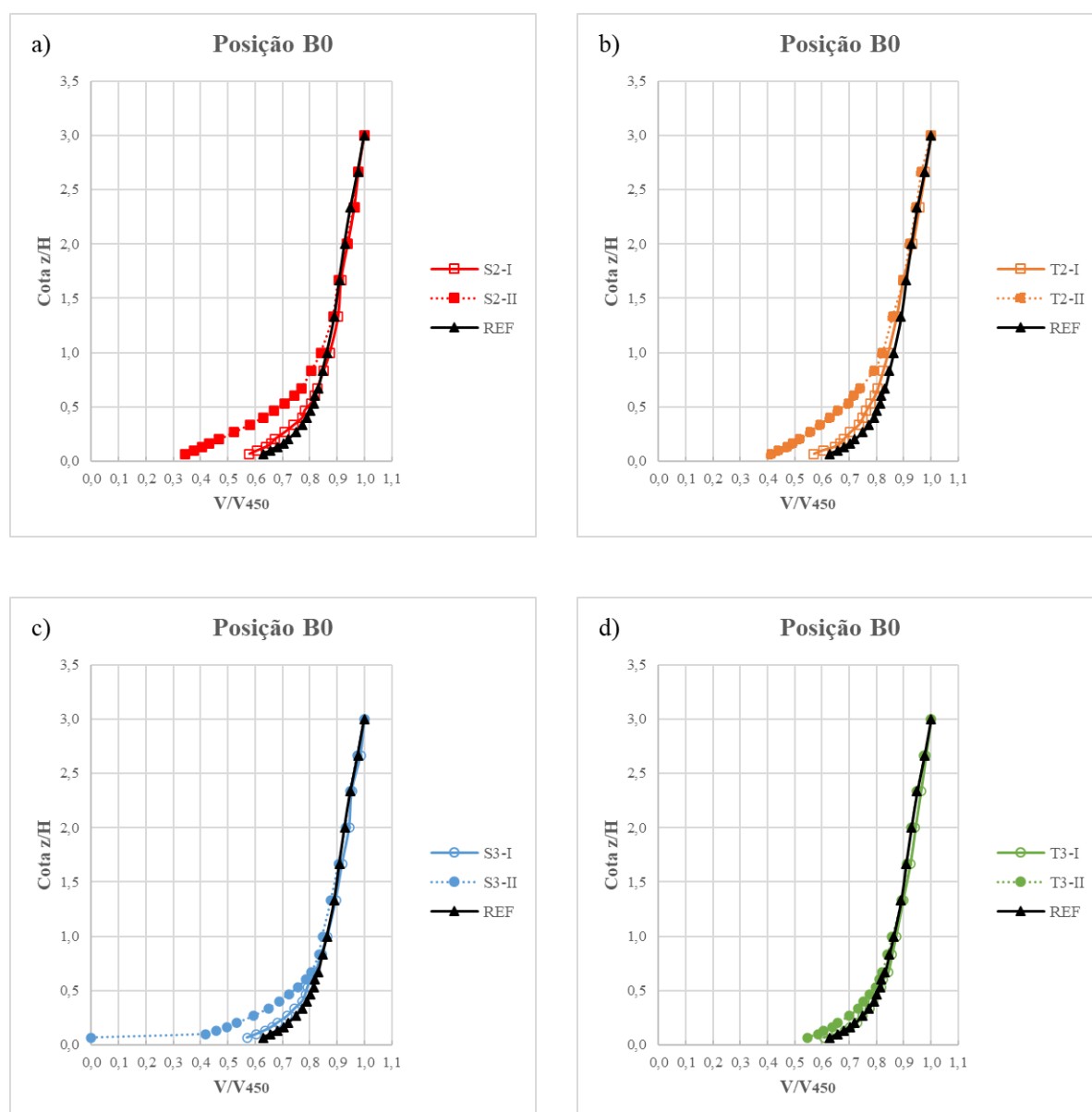


Figura 77 – Estudo comparativo da variável ângulo, posição de análise B0.

Analisando a influência da dimensionalidade dos morros, para a posição B0, observa-se que é uma variável que interfere nos valores de velocidades do perfil. Foram comparados entre si os

modelos: S2-I e S3-I (a), S2-II e S3-II (b), T2-I e T3-I (c), T2-II e T3-II (d), conforme a figura 78 (a) até (d). No geral, os morros 2D apresentam valores menores para as velocidades, as maiores variações são: +2%, -13%, -7% e -25%, respectivamente.

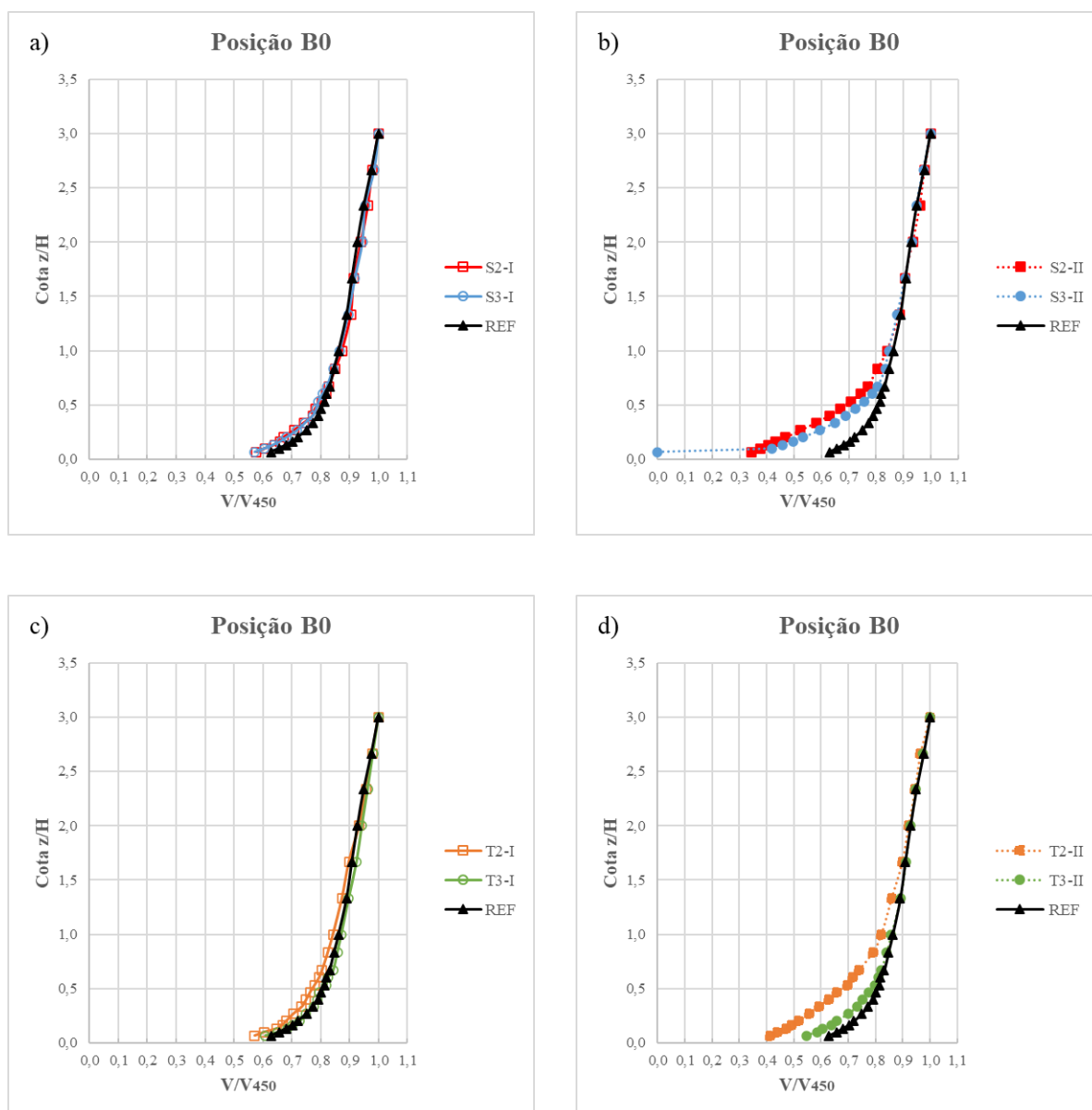


Figura 78 – Estudo comparativo da variável dimensionalidade, posição de análise B0.

A seção transversal do morro amplamente estudada por Nøstrud (1982), Pearse et al. (1981), Meroney et al. (1976) é uma variável que influencia no perfil de velocidade do vento. Os resultados obtidos da comparação entre os modelos S2-I e T2-I (a), S3-I e T3-I (b), S2-II e T2-II (c), S3-II e T3-II (d) podem ser visualizados na figura 79 (a) até (d). A comparação entre os

modelos sinusoidais e triangulares apresentam variação: +4%, -7%, -16% e -28%, variações positivas referem-se a velocidades maiores nos modelos sinusoidais.

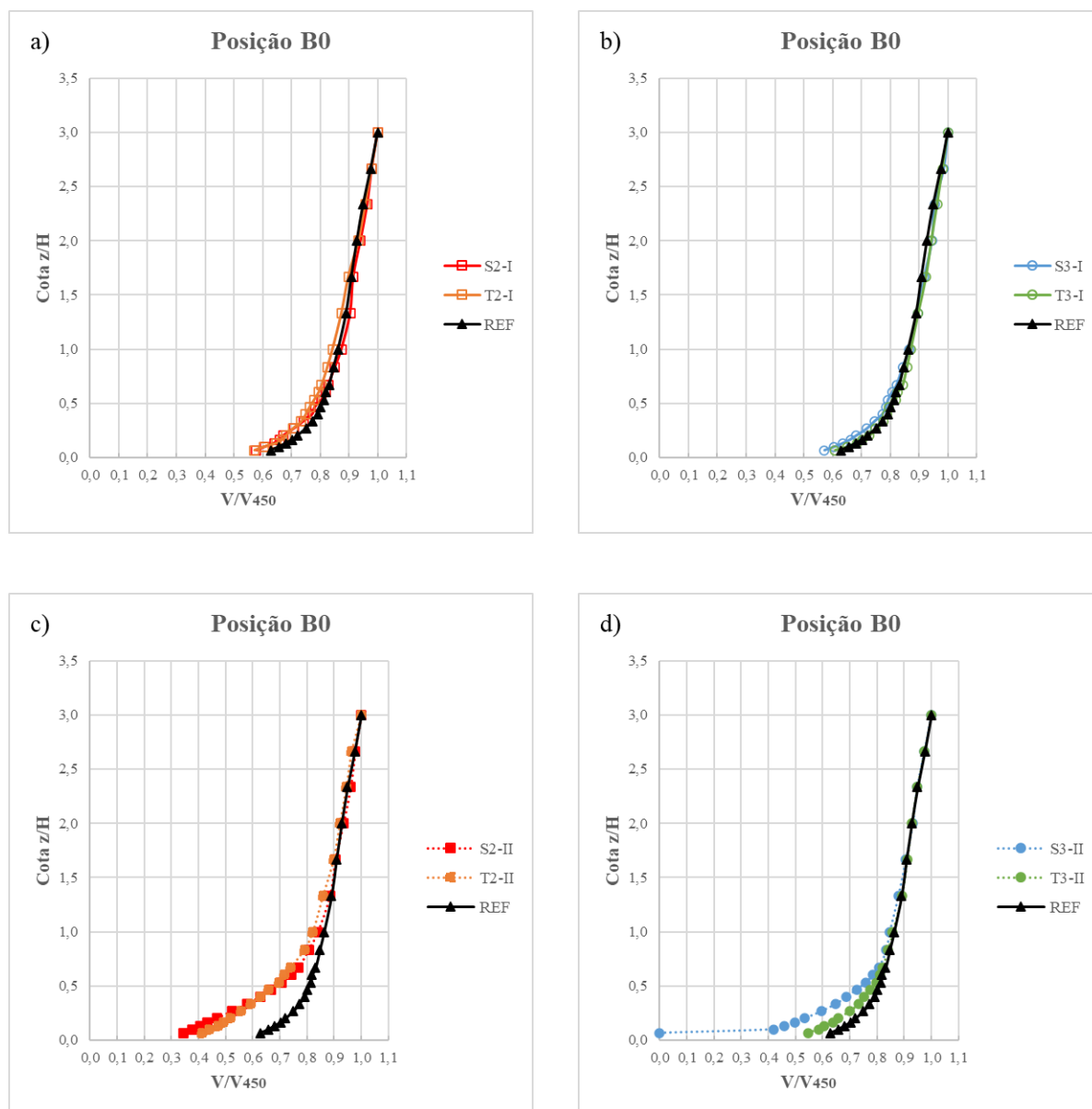


Figura 79 – Estudo comparativo da variável seção transversal, posição de análise B0.

Dentre as variáveis estudadas, nota-se que a barlavento a que mais influencia no perfil de velocidades é o ângulo. O maior ângulo apresentou as menores velocidades, enquanto que para o ângulo de 20° não teve grandes variações em relação ao perfil referência. A variável dimensionalidade apresentou uma maior variação, principalmente, para os modelos 2D.

5.1.1.2 Análise de resultados para a primeira etapa da pesquisa: posição P0

No cume do morro, denominada posição P0, são observados os maiores incrementos de velocidades. Do ponto de vista estrutural, o aumento causado pelo efeito *speed-up* no cume do morro, ocasiona ônus à estrutura, pois aumenta as cargas devidas à ação do vento.

A figura 80 mostra os resultados obtidos para a posição P0, e em todos os casos analisados houve significativo aumento de velocidades, principalmente, até a cota $Z/H = 1$. Para os modelos sinusoidais as maiores variações foram: +37%, +40%, +39% e +45%, referentes aos modelos S2-I, S2-II, S3-I, S3-II, respectivamente. Para os modelos triangulares as maiores variações foram: +30%, +31%, +48% e +43%, referentes aos modelos T2-I, T2-II, T3-I, T3-II, respectivamente.

Outro ponto importante a se destacar é a forma como o perfil se desenvolve em relação as cotas. Há uma tendência do perfil formar um “embarrigamento”, principalmente, nas cotas próximas ao solo. Este fenômeno também é observado na figura 9 do estudo proposto por Meroney et al. (1976). Kim et al. (1997) comprovaram que além dos morros isolados apresentarem este aumento significativo nas cotas mais próximas à superfície, se colocado um morro em sequência, este também apresenta o fenômeno do *speed-up* (figuras 15 e 16). Porém as velocidades observadas no segundo morro, em relação ao primeiro, são menores. Miller e Davenport (1998) implementaram vários morros em sequência e observaram que o efeito *speed-up* ainda pode ser observado no cume do terceiro morro na sequência (figura 19).

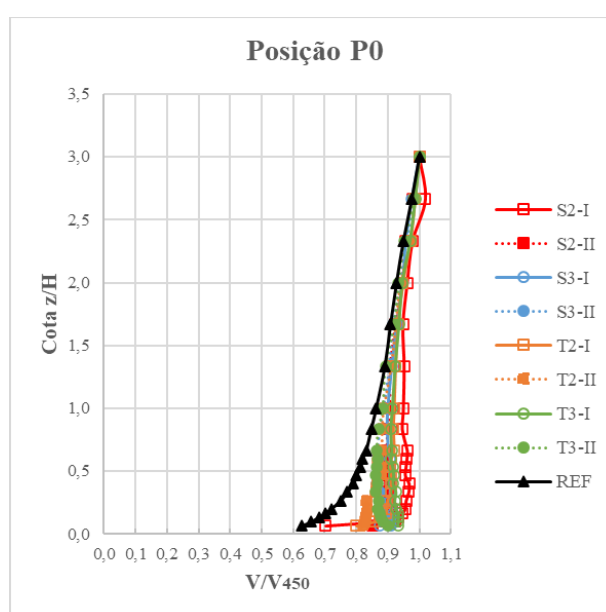
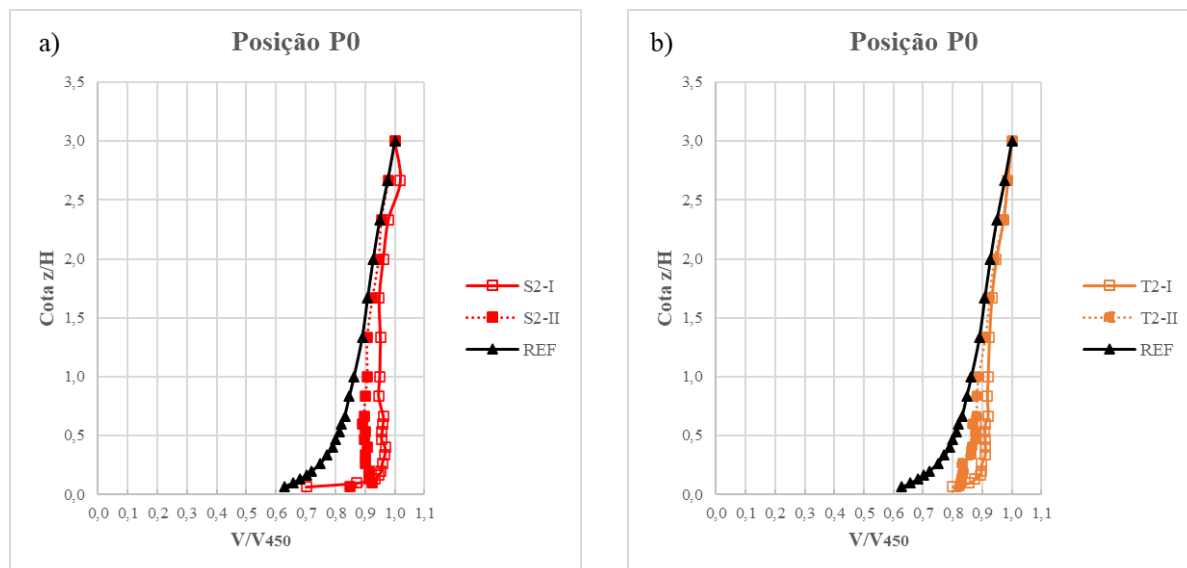


Figura 80 – Resultados experimentais para os morros da primeira etapa, posição de análise P0.

Analisando os gráficos comparativos da figura 81 (a) até (d) observa-se que em todos os casos as velocidades são maiores que a referência. Pela análise da variável ângulo, no geral, nota-se que o ângulo de 20° apresenta maiores velocidades em relação aos perfis do ângulo de 45° . Isto pode ser explicado pelo maior ângulo gerar mais desprendimento de vórtices no cume do morro, diminuindo as velocidades mais próximas à superfície. Outro ponto importante a se destacar é a região de recirculação a barlavento que é maior quanto maior a inclinação e que também pode ser um dos causadores desta diminuição. Nos estudos de Pearse et al. (1981), os autores também verificaram que não há uma linearidade entre a inclinação e o *speed-up*. Para os modelos triangulares as maiores amplificações foram para as inclinações de $0,5$ ($\sim 14^\circ$) e $0,3$ ($\sim 8^\circ$) e a inclinação $1,0$ ($\sim 26^\circ$) apresentou a menor amplificação dentre as estudadas.

Nota-se pelos gráficos da figura 81 (a) até (d) que os morros com inclinação de 45° , além de apresentarem as menores variações, apresentam menor influência ao longo das cotas, influenciando o perfil até a cota Z/H igual a $1,0$. Para os modelos com ângulo de 20° , a influência no perfil de velocidades pode ser observada em cotas mais altas.



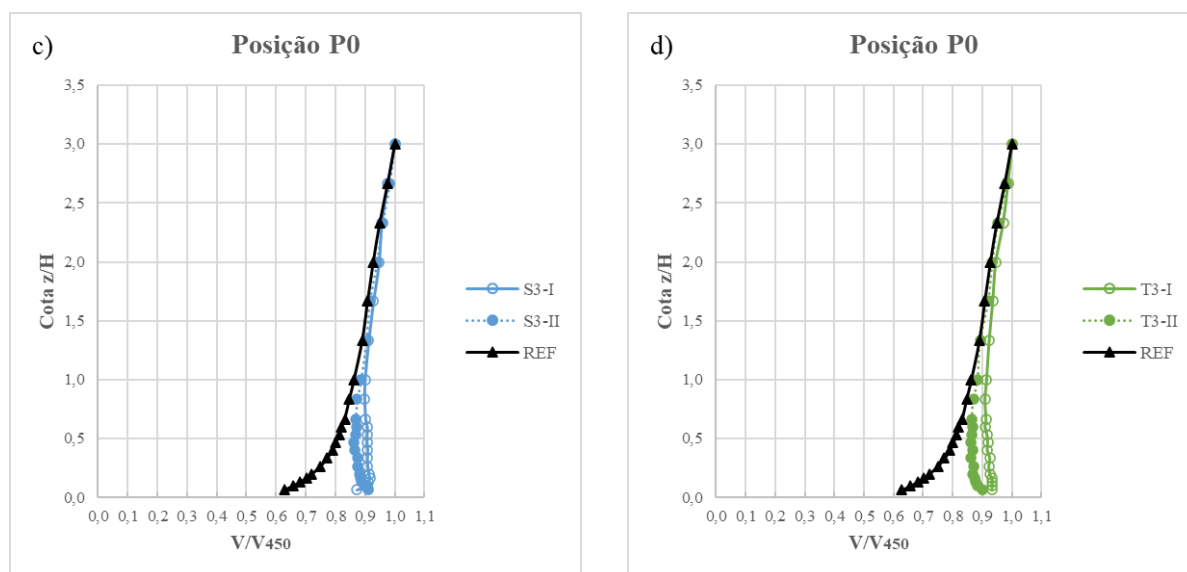
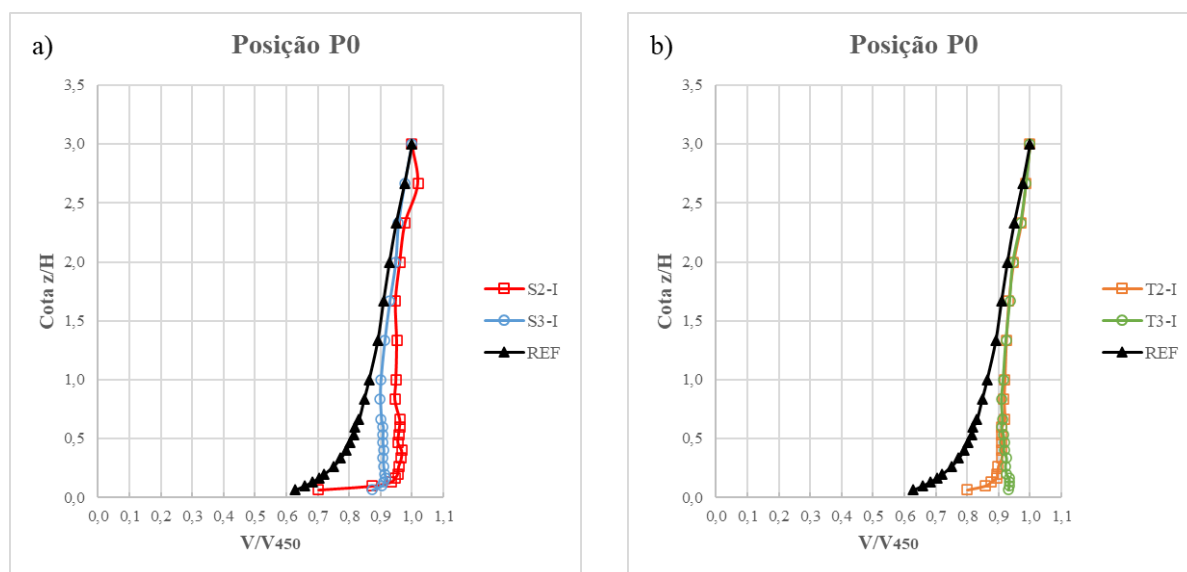


Figura 81 – Estudo comparativo da variável ângulo, posição de análise P0.

A dimensionalidade dos morros é uma das variáveis que modifica o perfil de velocidades, para a posição P0. Assim como para a posição a barlavento, foram comparados entre si os modelos: S2-I e S3-I (a), S2-II e S3-II (b), T2-I e T3-I (c), T2-II e T3-II (d), conforme a figura 82. No geral, os morros 2D apresentam valores menores para as velocidades, as maiores variações são: -20% (apenas para o primeiro ponto, os demais apresentam variação de até +7%), -7% (apenas para o primeiro ponto, os demais apresentam variação de até +4%), -14% e -8%, respectivamente.



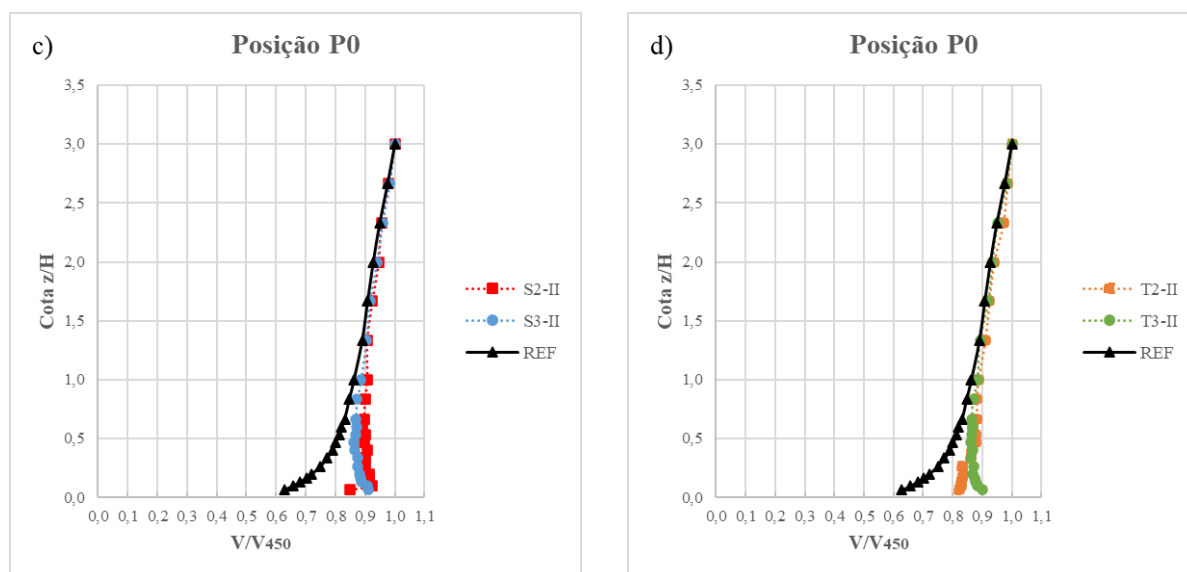


Figura 82 – Estudo comparativo da variável dimensionalidade, posição de análise P0.

Como pode-se observar nos gráficos da figura 82 as cotas mais próximas à superfície, até cota Z/H igual a 0,25 aproximadamente, apresentam velocidades mais altas para os modelos 3D. Em seguida os modelos 2D é que apresentam velocidades maiores e em algumas cotas não há variação entre modelos 2D e 3D. A forma dos perfis difere entre os modelos 3D e 2D, no geral, os modelos 3D começam em determinado valor e diminuem até determinado ponto em que as velocidades não são mais afetadas pela presença do morro. Diferentemente para os modelos 2D, que iniciam com um valor maior, e depois diminuem até o ponto em que entram em conformidade com o perfil de velocidades do vento não influenciado pela presença do morro.

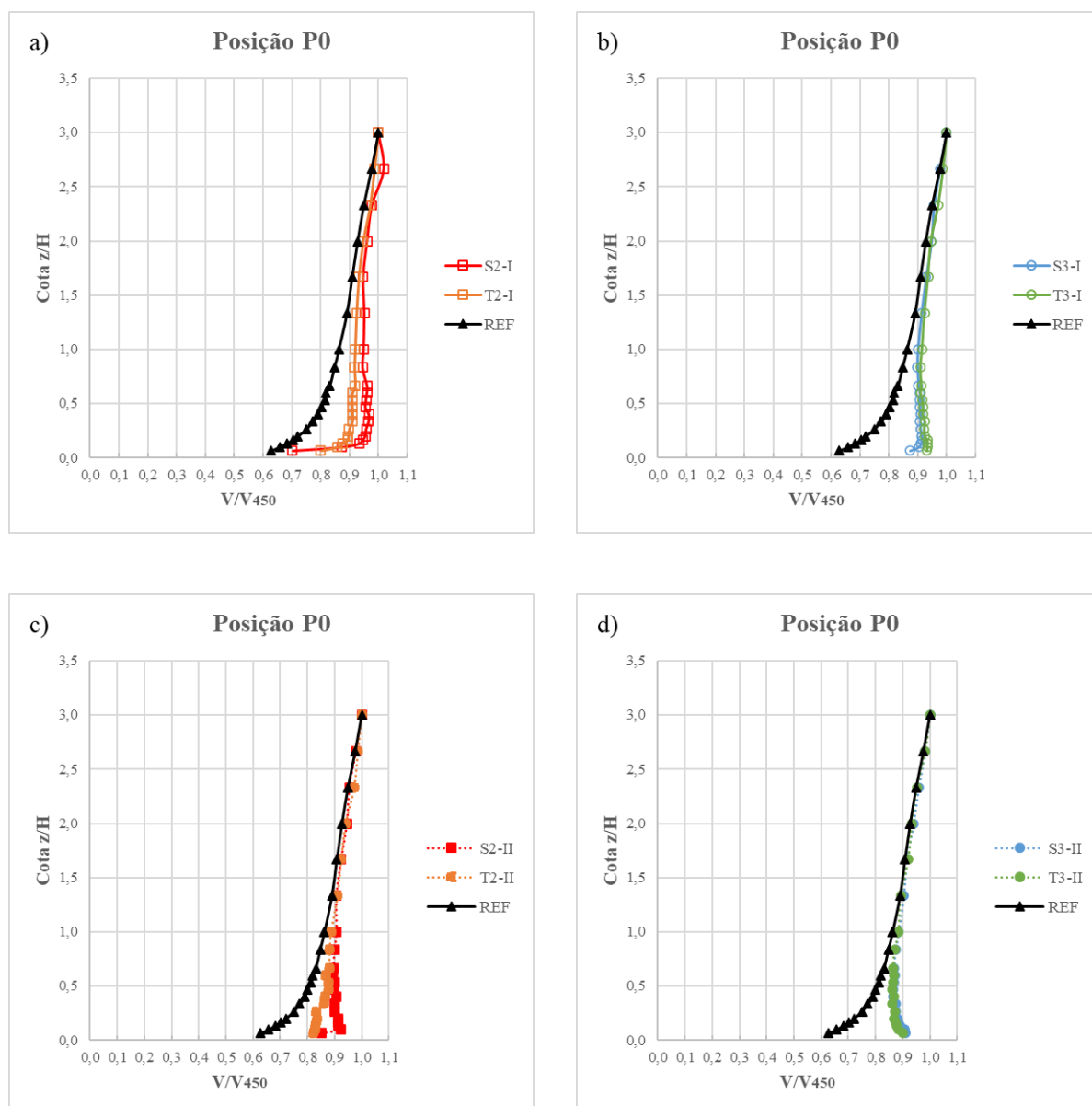


Figura 83 – Estudo comparativo da variável seção transversal, posição de análise P0.

A diferença entre as seções transversais sinusoidal e triangular, para a posição P0 apresentada nos gráficos da figura 83 (a) até (d) mostra uma diferença entre os modelos 2D e 3D. Enquanto que, entre os modelos 3D a variação entre as seções é quase que inexistente. Para o modelo 3D com ângulo de 45° as diferenças variam entre -1% e +3% e para o modelo 3D de 20°, exceto a primeira cota que teve -6%, as demais cotas variaram entre -3% e 0. Podendo ser considerados perfis praticamente iguais entre si.

Por outro lado, os modelos 2D apresentaram diferenças maiores comparativamente entre as seções transversais triangular e sinusoidal, tanto para o ângulo de 20° quanto para o de 45°. Nos

estudos de Arya et al. (1987), onde foram estudados modelos 2D, estas diferenças também foram observadas entre o modelo triangular e os modelos de seção transversal Russa. A seção transversal do modelo Russo é muito semelhante ao modelo sinusoidal.

5.1.1.3 Análise de resultados para a primeira etapa da pesquisa: posição S

A sotavento do morro, denominada posição S, o perfil de velocidades é bem diferente das demais posições estudadas. Nesta posição nota-se que há uma grande variação de velocidades e até, aproximadamente, a cota Z/H igual a 0,75 as velocidades são em torno de 10% a 20% da velocidade V_{450} , conforme a figura 84. Estas velocidades bem reduzidas em relação ao perfil referência são causadas pelas regiões de recirculação e desprendimento dos vórtices, formando a região da esteira. Comparativamente em relação a referência o modelo que apresentou a maior diferença foi o modelo S-2D-11-45 e a diferença é de 87%. Segundo os estudos de Pearse et al. (1981) a região da esteira é observada a partir da razão H/L igual a 0,5, que é em torno de 14° , com isso os resultados apresentados nesta seção se apresentam em conformidade com estes autores.

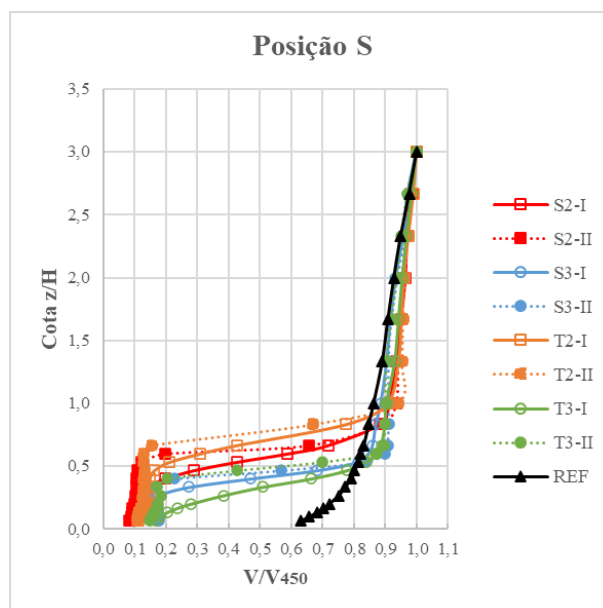


Figura 84 – Resultados experimentais para os morros da primeira etapa, posição de análise S.

Assim como as demais posições, as comparações entre as variáveis ângulo, dimensionalidade e seção transversal serão apresentadas mais detalhadamente pelas figuras 85, 86 e 87. A comparação entre os ângulos de 20° e 45° apresentaram variações entre si. No geral, as baixas velocidades tendem a persistir por cotas mais altas, para o ângulo de 45° . Além disso, a

transição das velocidades ocorre mais bruscamente, enquanto que para o ângulo de 20° ocorre de forma mais gradual.

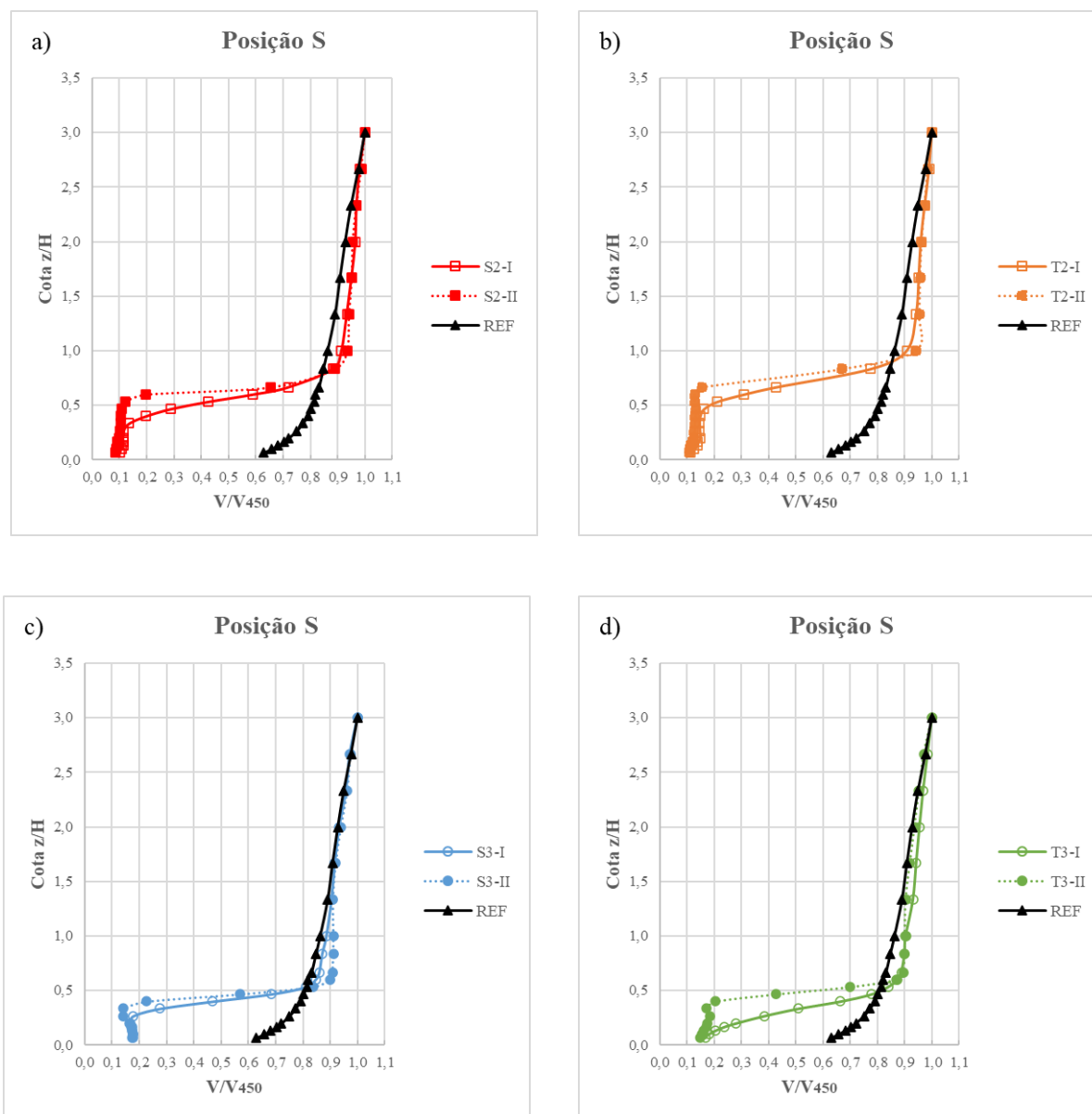
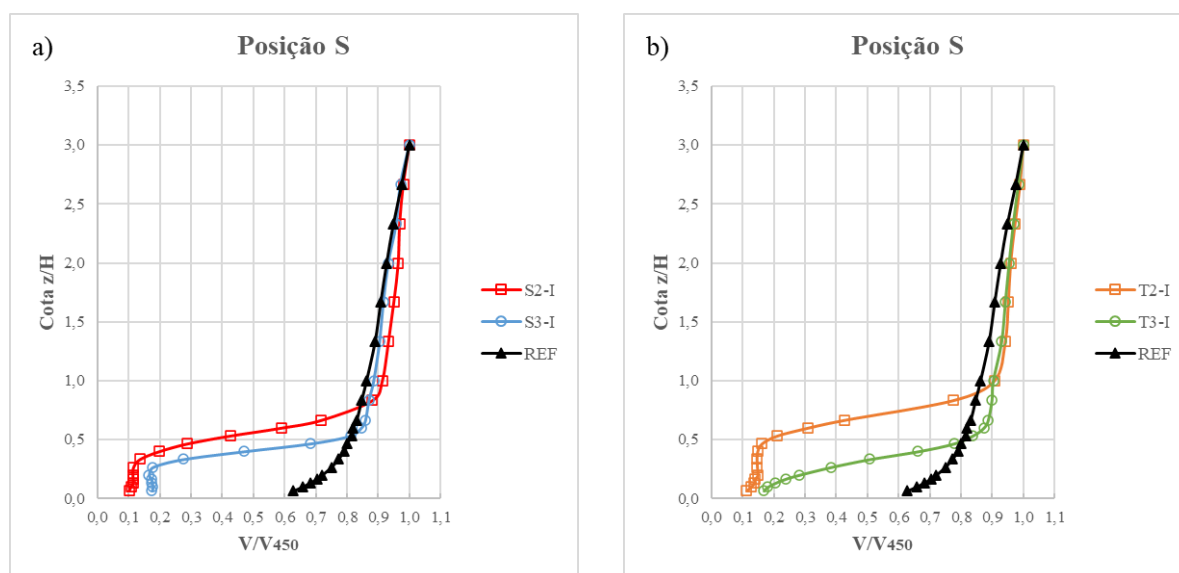


Figura 85 – Estudo comparativo da variável ângulo, posição de análise S.

A variação entre os ângulos de 20° e 45° no comportamento do perfil de velocidades, que mostra a maior influência pelo ângulo de 45° é coerente com os resultados dos estudos de Pirooz e Flay (2018). Os autores obtiveram como resultado que quanto maior a inclinação do morro maior é a região de recirculação e, conseqüentemente, mais influência no perfil de velocidades.

A comparação entre os modelos 2D e 3D mostrou-se com grande variabilidade. No geral, os modelos bidimensionais tendem a apresentar valores menores para as velocidades, conforme mostram os gráficos da figura 86. Além disso, a influência da esteira é percebida em cotas mais altas em relação a modelagem 3D. Esta diferença entre as dimensionalidades pode ser explicada pela limitação que as linhas de corrente têm em transpor o modelo 2D. Enquanto que as linhas de correntes do modelo 2D, devem contornar o modelo apenas contornando a parte superior do morro, as linhas de corrente do modelo 3D podem contornar o morro pelo cume e também pelas laterais, fazendo com que o escoamento fique menos perturbado pela presença do morro.

As maiores variações observadas entre as comparações S2-I e S3-I (a), S2-II e S3-II (b), T2-I e T3-I (c), T2-II e T3-II (d), foram: -58%, -85%, -79% e -85%, respectivamente. Para os modelos 2D, a influência da esteira foi até a cota Z/H igual a 1, como as medições são sempre a partir da superfície para estes casos, observa-se que ainda há redução acima da altura do morro. Para os modelos 3D, a influência da esteira é observada até cotas Z/H igual a 0,5, com isso pode se concluir que a esteira influencia a região a sotavento e abaixo da altura do morro. Desta forma, o resultado deste estudo concorda com o estudo proposto por Pirooz e Flay (2018).



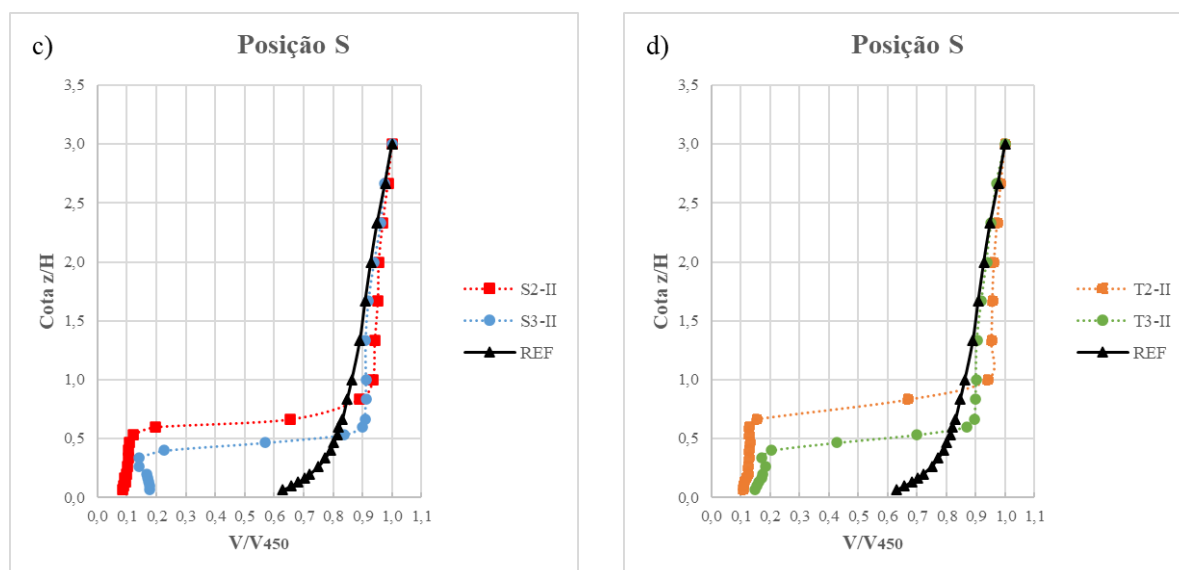


Figura 86 – Estudo comparativo da variável dimensionalidade, posição de análise S.

Assim como nas demais posições analisadas, a comparação entre os modelos triangular e sinusoidal não apresentou grandes variações (figura 87 (a) até (d)). Apesar de não haver perfis tão díspares entre si, os modelos 2D são os que apresentaram maiores variações entre as cotas. As comparações analisadas foram S2-I e T2-I (a), S2-II e T2-II (c), S3-I e T3-I (b) e T3-II e S3-II (d). Para a comparação entre os modelos S2-I e T2-I a variação -23% a 103%, ou seja, quando a variação é negativa quer dizer que o modelo sinusoidal é 23% menor que o modelo triangular e vice-versa. O modelo 3D para o ângulo de 20° apresentou uma variação entre -54% a 4%, exceto a primeira que é positiva o restante do perfil mostra que o modelo sinusoidal é menor que o triangular. Para o modelo S2-II e T2-II, a variação observada é entre -21% até +326%. Esta variação de 326%, mostra que o mesmo ponto o modelo sinusoidal já não está mais na região de esteira, porém o mesmo ponto para o modelo triangular ainda se encontra na região afetada pela esteira.

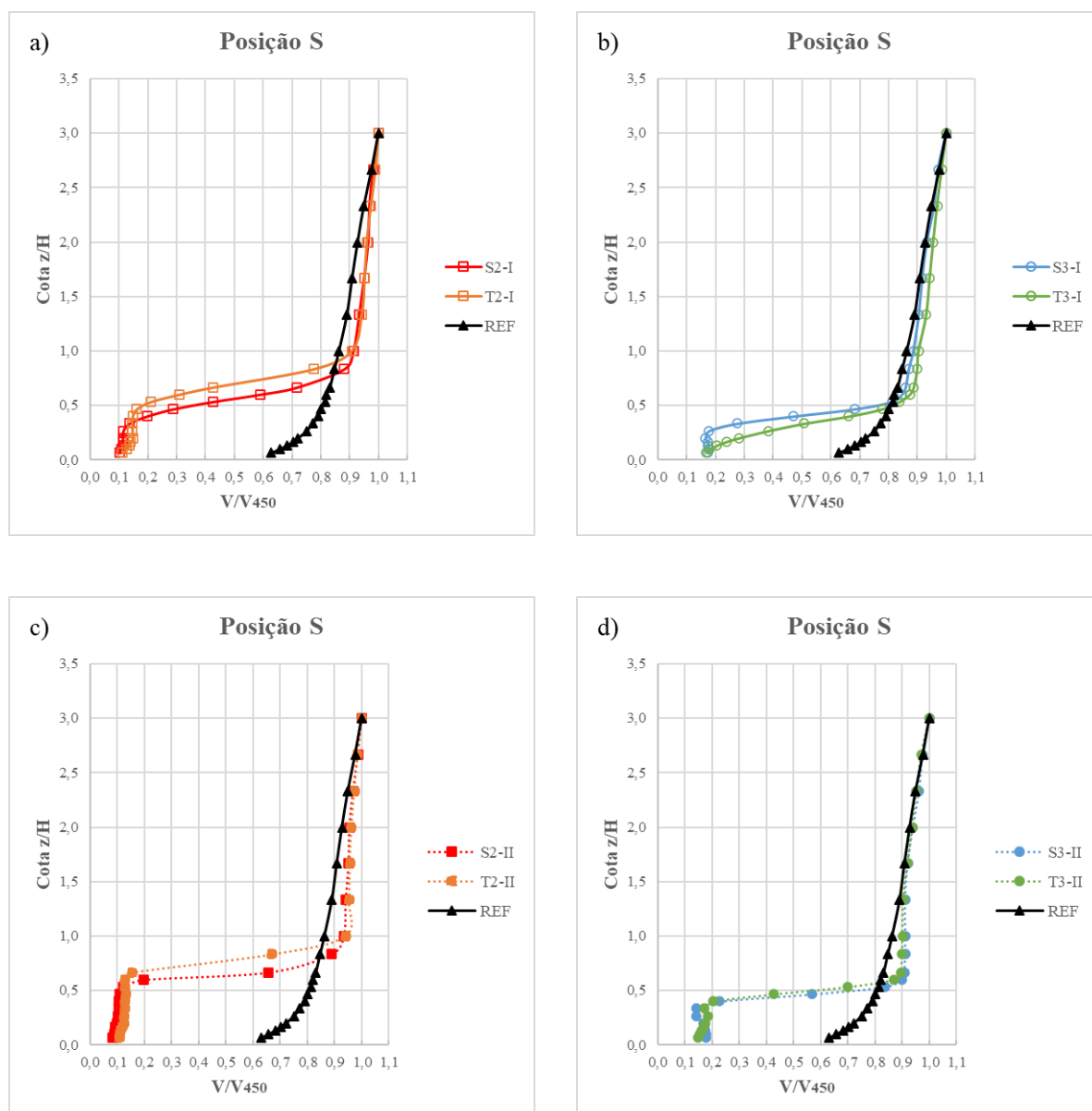


Figura 87 – Estudo comparativo da variável seção transversal, posição de análise S.

5.1.2 Resultados experimentais e análises para a segunda etapa: morros com extensão do cume e sem patamares intermediários a barlavento

Os resultados experimentais nesta etapa da pesquisa abordam os morros com extensões do cume e sem patamares intermediários a barlavento. Para esta etapa da pesquisa as variáveis são:

- seção transversal: sinusoidal e triangular;
- dimensionalidade: 2D e 3D;
- ângulo: 20° e 45° ;

- d) extensão do cume do morro igual a $1H$ e $3H$, onde H é a altura do morro que é igual a 150 mm .

As topografias observadas na natureza apresentam características bem diferentes daquelas apresentadas na primeira etapa. Geralmente, as topografias mais comuns são taludes ou morros com grandes platôs ou, como definido nesta tese, extensão do cume. Esta extensão, assim como as demais variáveis, influencia no perfil de velocidades, principalmente, no cume do morro próximo a borda a barlavento. As figuras 88 a 91 apresentam o comportamento dos perfis de velocidades para o morro em estudo. Além disso, pode ser analisado como as demais variáveis são influenciadas por esta nova variável. As posições descritas nas figuras 87 e 88 são: B0, P0, P150 e S, para as figuras 89 e 90 as posições são B0, P0, P150, P300, P450 e S. As figuras apresentam um esquema das seções transversais sinusoidal, em preto, e triangular, em vermelho.

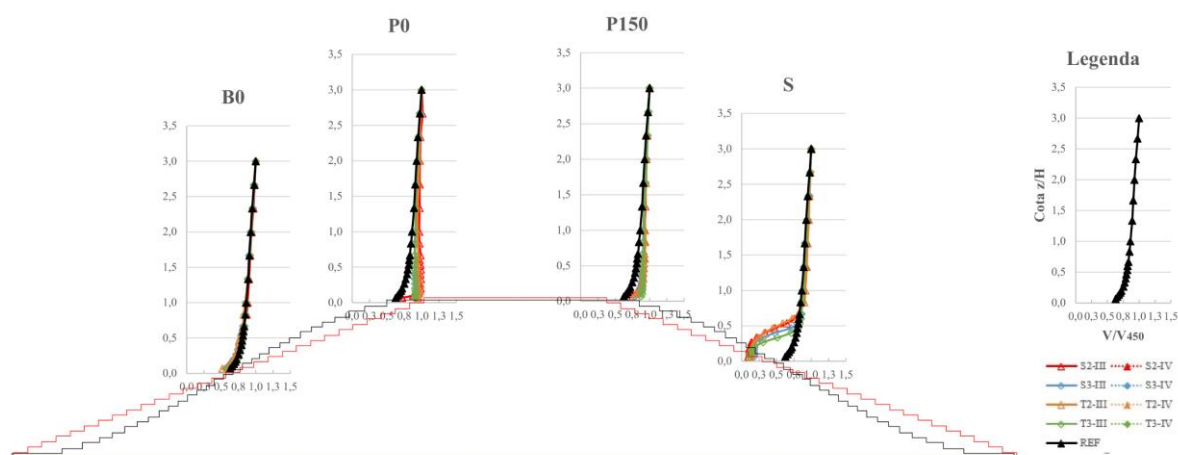


Figura 88– Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 20° e extensão do cume igual a PIH .

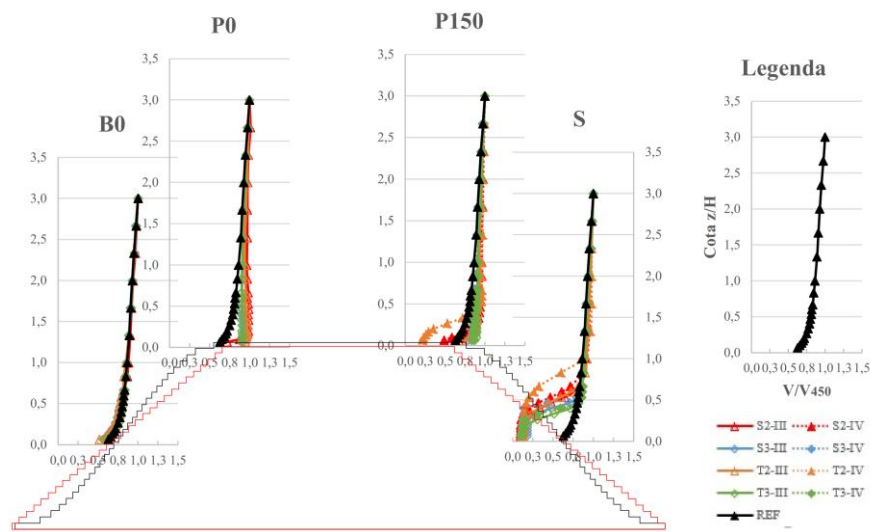


Figura 89 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 45° e extensão do cume igual a PIH.

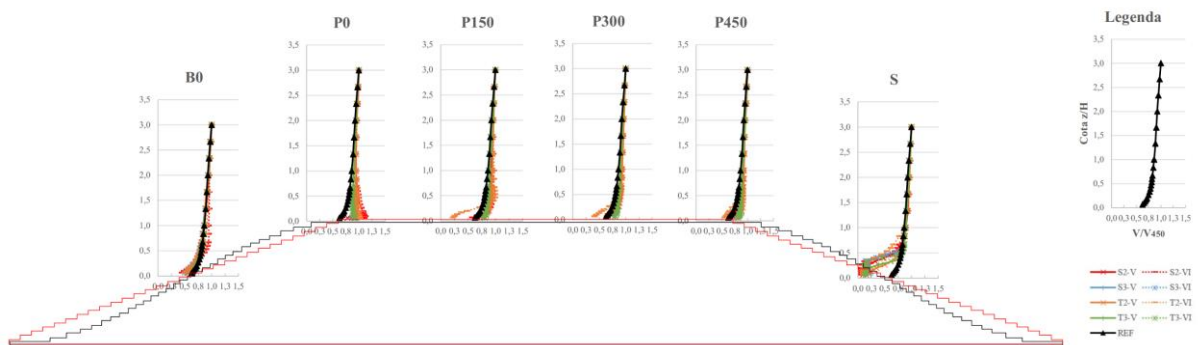


Figura 90 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 20° e extensão do cume igual a P3H.

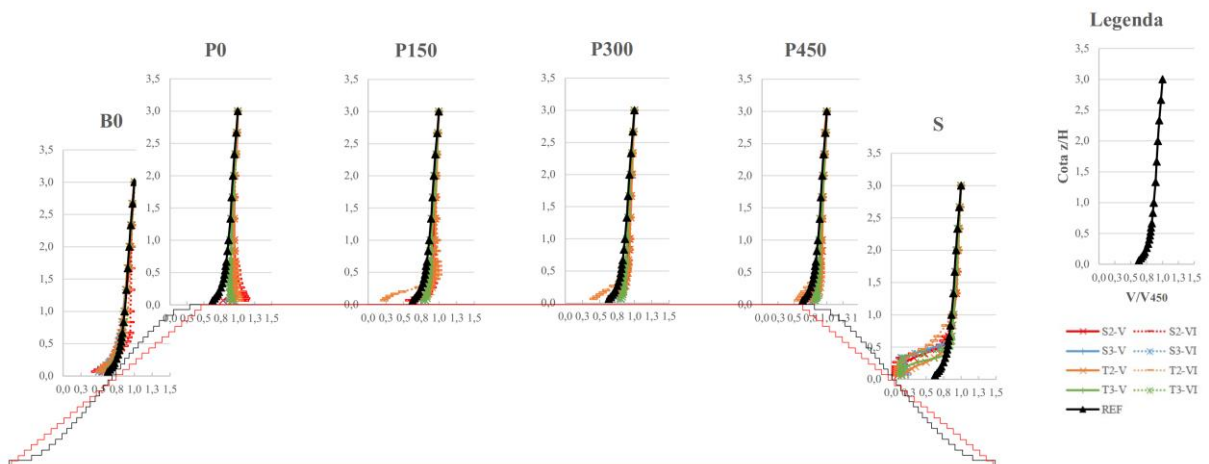


Figura 91 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa com ângulo de 45° e extensão do cume igual a P3H.

A análise desta nova variável, permite observar que, influencia no perfil de velocidades do vento. Esta constatação fica evidente para o morro com ângulo de 45° e extensão do cume igual P3H, ou seja, três vezes a altura do morro. Neste modelo se observa uma redução drástica nas velocidades para as posições P150 e P300, um efeito muito parecido com o que ocorre na região de esteira. Os modelos com ângulo de 20°, no geral, não apresentaram uma mudança de comportamento tão significativa quanto o ângulo de 45°. Dessa forma, reitera as afirmações da primeira etapa da pesquisa.

O efeito *speed-up*, na posição P0, é bem definido e ocorre em todas as variações de modelos estudadas. Para as posições a sotavento ainda é possível observar este efeito para o modelo de 20°, para o ângulo de 45° não é possível afirmar o mesmo. Neste ângulo observa-se que além da influência do ângulo, a dimensionalidade afeta o perfil de velocidade. A sotavento dos morros, na posição S, em todas variações estudadas a formação da região da esteira é observada.

Para avaliar o quanto a variável desta fase interfere nos perfis de velocidades ao longo do morro, a análise é apresentada de forma similar à primeira etapa por posição de análise.

5.1.2.1 Análise de resultados para a segunda etapa da pesquisa: posição B0

Os resultados experimentais para os modelos com extensão do cume P1H e P3H, para a posição de análise B0, podem ser visualizados na figura 92. Diferentemente da primeira etapa, onde todos os modelos apresentaram reduções no perfil de velocidades, nesta etapa alguns dos modelos ensaiados com extensão do cume apresentaram acréscimo na posição B0. A influência maior pode ser observada para o ângulo de 45°, onde apresenta trechos de velocidades menores e maiores que a referência. Este comportamento não é tão comum, geralmente os perfis, mesmo a barlavento começam a apresentar trechos de acréscimo de velocidades sem apresentar trechos de menor velocidade. Holmes (2001), explica que há uma diminuição das velocidades a barlavento, entretanto, há um ponto ainda a barlavento onde as velocidades começam a aumentar gradativamente até chegar no cume, onde se tem as maiores velocidades.

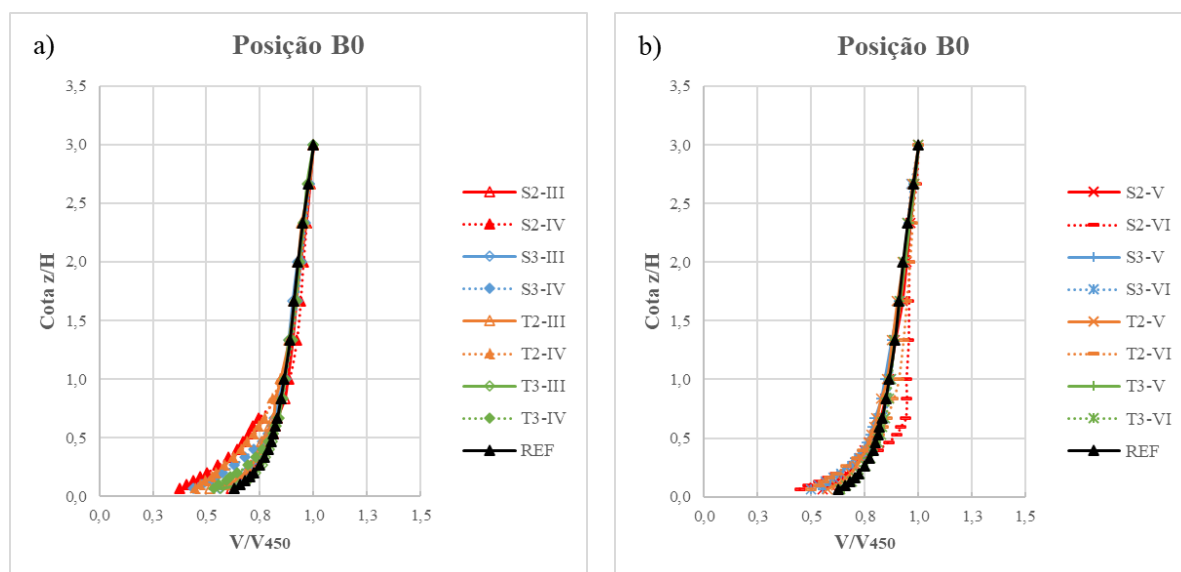


Figura 92 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise B0, morro com extensão P1H (a) e P3H (b).

Os gráficos do estudo comparativo entre os ângulos 20° e 45° considerando também as duas extensões P1H e P3H podem ser visualizados no apêndice A (Figuras A1 a A4). Para os modelos 3D sinusoidal e triangular observa-se que, qualitativamente, os perfis são muito semelhantes ao do perfil referência, com uma tendência do ângulo de 45° apresentar pontos onde as velocidades são menores. Para os modelos 2D as diferenças são maiores com destaque, novamente, para o ângulo de 45° .

A tendência do ângulo de 45° apresentar mais variações que o ângulo de 20° pode ser explicada por ser uma barreira mais íngreme, gerando uma região de recirculação a barlavento. Nos estudos de Sherry et al. (2010), os autores acreditam que para um obstáculo de 90° com altura “h”, a região de recirculação a barlavento varia entre $1h$ e $1,2h$.

A dimensionalidade dos morros, pelas análises anteriores, nem sempre se mostrou uma variável que influencia nos perfis de velocidades a barlavento. Para os modelos com ângulo de 20° esta é uma variável que tem pouco ou nenhuma influência, tanto para extensões de P1H quanto para as de P3H. Foram comparados entre si os modelos: S2-III e S3-III, S2-IV e S3-IV, S2-V e S3-V, S2-VI e S3-VI. No geral, os morros 2D apresentam valores maiores para as velocidades, as maiores variações são: +10%, -15%, +7% e +12%, respectivamente. Diferentemente, para os modelos triangulares os modelos 3D tiveram as maiores velocidades. As combinações realizadas são: T2-III e T3-III, T2-IV e T3-IV, T2-V e T3-V, T2-VI e T3-VI, as variações

máximas são, respectivamente, -9%, -16%, -11%, -22%. Os gráficos comparativos entre os modelos 2D e 3D podem ser visualizados no apêndice A (Figuras A5 a A8). Para esta etapa nota-se que há uma tendência dos modelos 2D apresentarem maior interferência no perfil de velocidades. Entretanto, para o modelo SD-III a diferença máxima é de apenas -4% em algumas cotas do perfil, o que mostra que para este modelo as variáveis não tiveram grande influência.

A seção transversal do morro amplamente estudada por Nøstrud (1982), Pearse et al. (1981), Meroney et al. (1976) é uma variável que influencia no perfil de velocidade do vento. Na figura 92 são apresentadas as combinações entre os modelos: S2-III e T2-III, S2-V e T2-V, S2-IV e T2-IV, S2-VI e T2-VI são, respectivamente, +20%, -16%, -5%, -10%. Para os modelos tridimensionais: S3-III e T3-III, S3-V e T3-V, S3-IV e T3-IV, S3-VI e T3-VI são, respectivamente, -8%, -18%, -15%, -22%. Em tese, os modelos sinusoidais tendem a apresentar valores menores que os modelos triangulares, conforme é apresentado apêndice A (Figuras A9 a A12).

O objetivo desta segunda etapa é analisar como a extensão do cume interfere no perfil de velocidades do vento em relação aos morros sem extensão. Os gráficos da figura 93 apresentam qualitativamente o comportamento desta variável para os modelos sem extensão P0H e com extensão P1H e P3H.

Considerando as seguintes combinações S2-III e S2-V, S2-IV e S2-VI, S3-III e S3-V, S3-IV e S3-VI, obtém-se que as maiores variações são, respectivamente, +11%, -8%, +9% e -12%. Para os modelos triangulares as combinações são: T2-III e T2-V, T2-IV e T2-VI, T3-III e T3-V, T3-IV e T3-VI, obtém-se que as maiores variações são, respectivamente, -11%, -12%, -13% e -16%. A análise comparativa entre os modelos com extensão de P1H e P3H, mostra que no geral os modelos com extensão de P1H comparativamente com os modelos com extensão P3H tendem a apresentar velocidades menores.

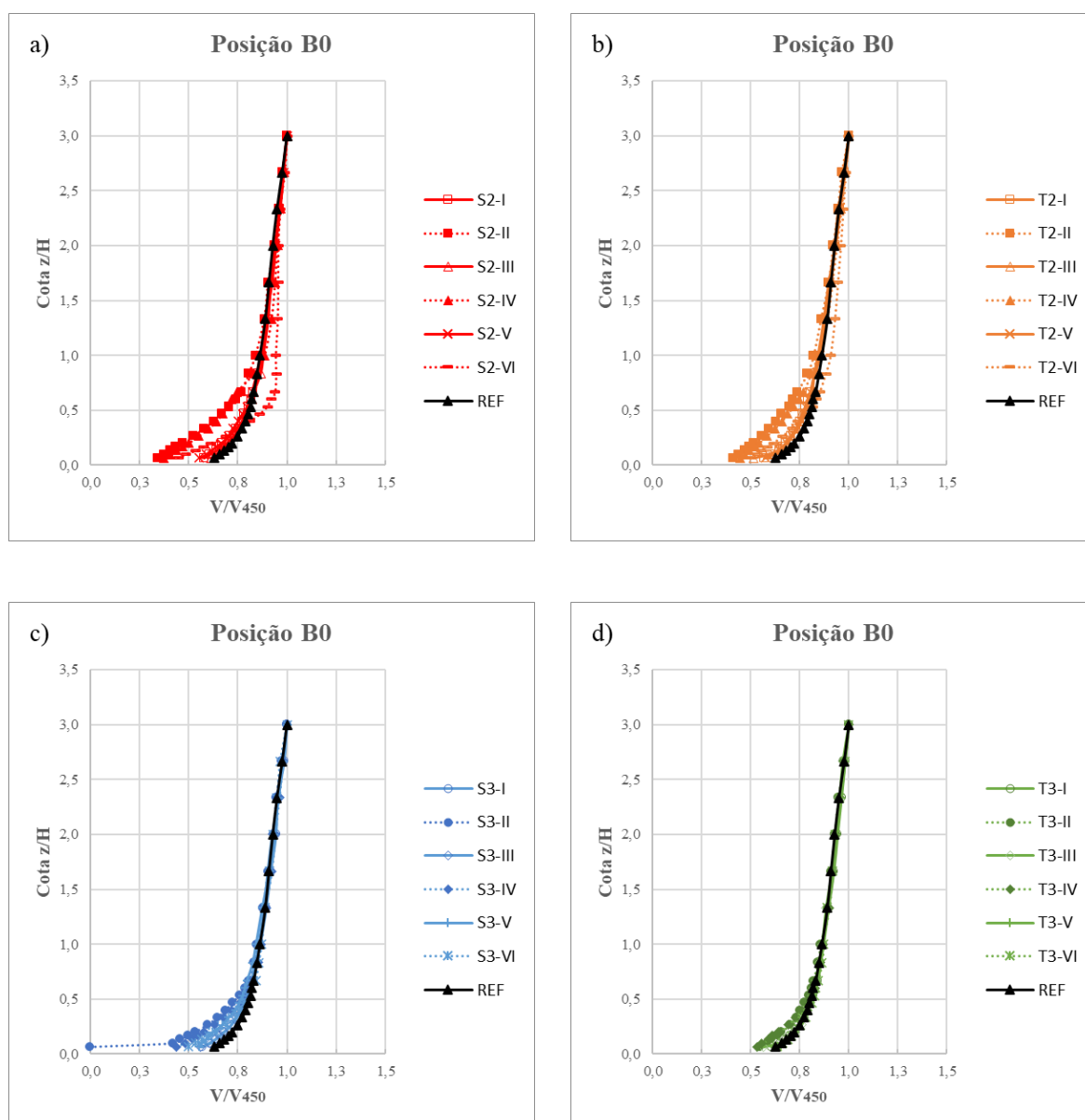


Figura 93 – Estudo comparativo entre a extensão do cume P1H e P3H e o modelo P0H, posição de análise B0.

Os morros com extensão do cume em relação a morros sem extensão apresentaram grandes diferenças principalmente os modelos 2D com ângulo de 45° . Em alguns casos, como por exemplo, S2-VI as velocidades foram cerca de 30% maiores que o modelo S2-II. Outro modelo que apresentou o mesmo comportamento foi o modelo triangular T2-VI, porém a diferença foi de 21%, um pouco menor que o modelo sinusoidal, este por sua vez, comparado ao modelo T2-II.

5.1.2.2 Análise de resultados para a segunda etapa da pesquisa: posição P0, P150, P300 e P450

O cume do morro, como na etapa anterior, apresentou os maiores incrementos de velocidades. Com a extensão do cume, outros pontos neste patamar que se formou foram obtidos. Para a extensão P1H, foi medido o ponto P150. Para a extensão P3H, além do ponto P150, mediu-se os pontos P300 e P450. Estes valores são referentes a distância em relação ao P0, por exemplo, P150 está a 150 mm do P0. As figuras 94 a 97 apresentam os resultados para os modelos estudados, conforme a posição de análise P0, P150, P300 e P450, respectivamente.

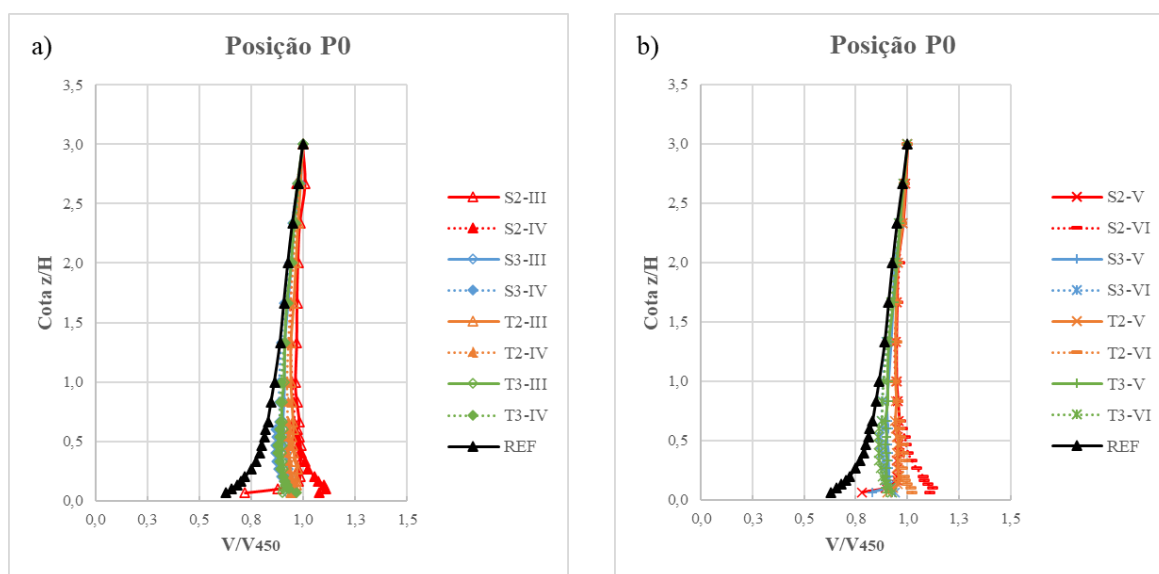


Figura 94 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P0 morro com extensão P1H (a) e P3H (b).

Para a posição P0, como já mencionado na primeira etapa, a tendência do perfil formar um “embarrigamento”, principalmente, nas cotas próximas ao solo se manteve com a extensão do cume.

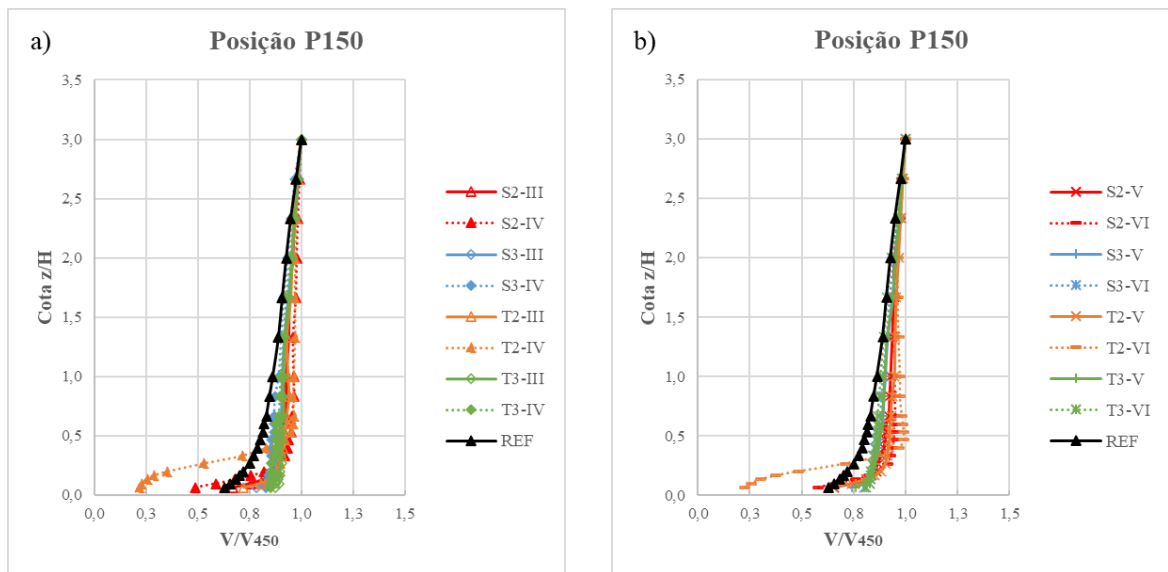


Figura 95 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P150.

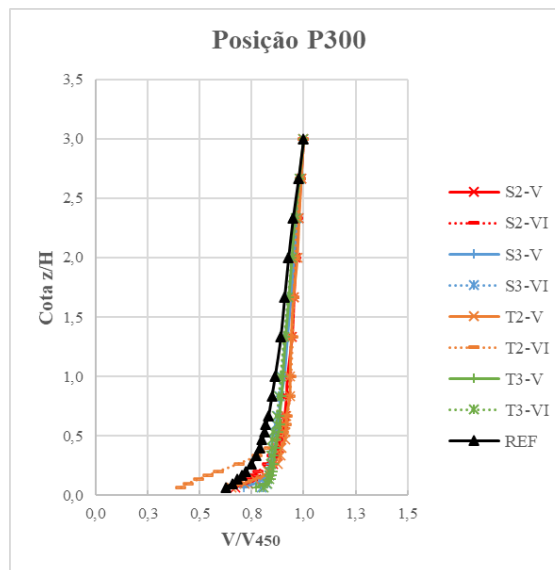


Figura 96 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P300.

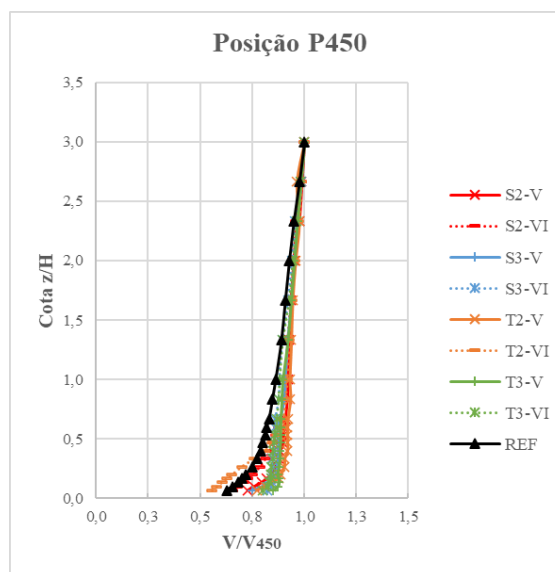


Figura 97 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise P450.

No geral, o incremento de velocidades é observado na maioria das posições. Para P0 todos os modelos apresentaram velocidades maiores que a referência. A 150 mm, onde está localizado a posição P150 em alguns dos modelos 2D pode ser observada uma grande redução das velocidades, esta constatação também é notada para a posição P300.

A redução das velocidades em posições a sotavento da borda pode ser explicada pelo ângulo. Isto porque, ângulo maiores tendem a gerar desprendimento de vórtices, formando em seguida uma região de recirculação. Segundo Serry et al. (2010), a região de recirculação no patamar pode ser entre $1,9h$ e $4h$, onde h é a altura do objeto imerso no escoamento, reiterando os conceitos da Organização Mundial de Meteorologia (WORLD, METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1960).

Nos modelos onde não são evidentes a presença de regiões de recirculação, principalmente nos modelos de 20° , as velocidades do perfil tendem a diminuir conforme se afastam da borda. Esta diminuição ocorre até onde o morro não exerça mais influência no escoamento do vento. Dentre as normativas de taludes, a NBR 6123 considera que a distância entre a borda até o ponto onde não haja mais a influência da topografia é de $4d$, sendo d altura do morro. A partir deste ponto o perfil de velocidades pode ser considerado igual ao perfil referência, e o fator topográfico é considerado 1,0. Para entender o efeito causado pelo prolongamento do cume do morro, a figura 98 apresenta um estudo comparativo entre os modelos P0H, P1H e P3H.

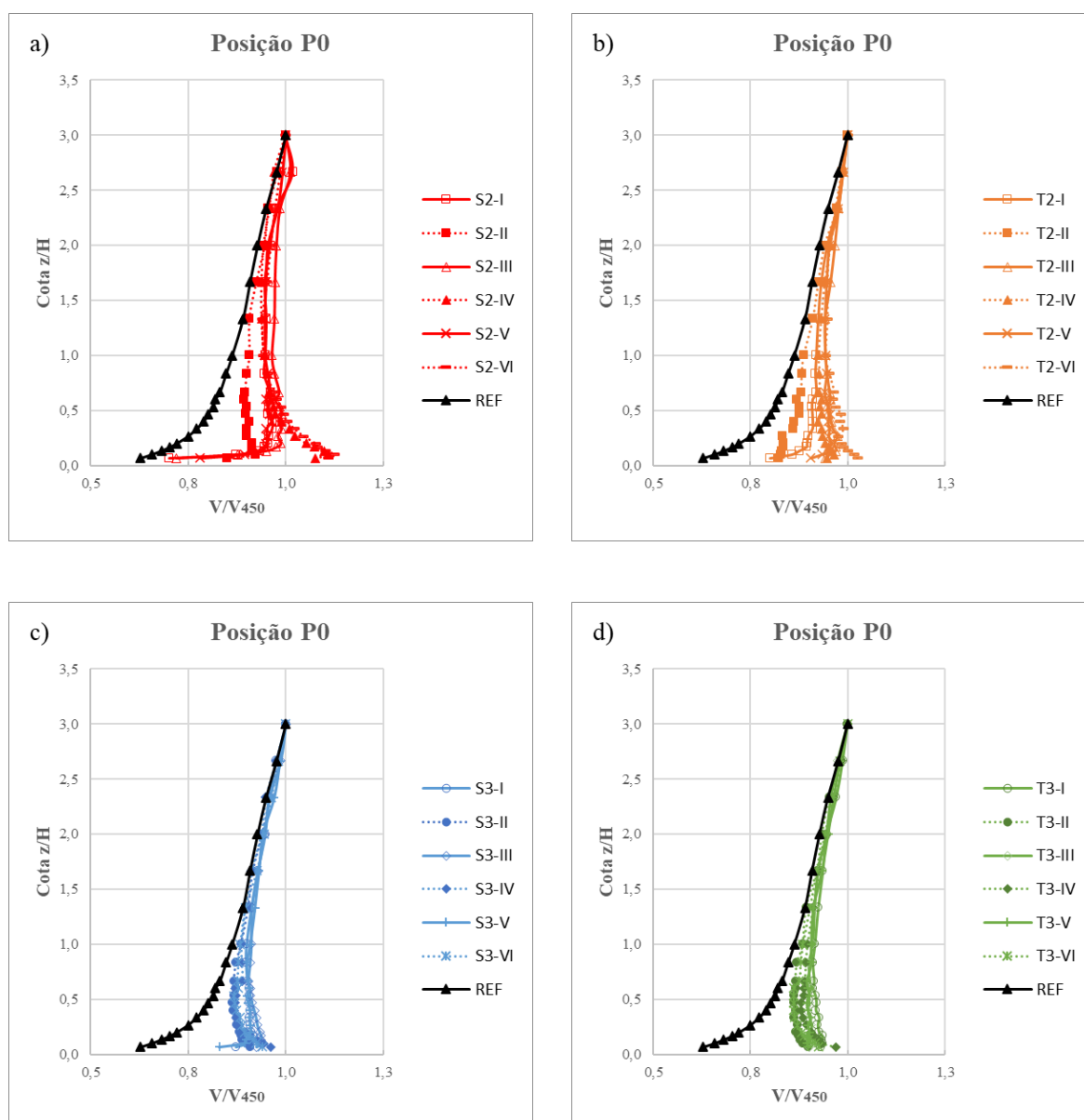


Figura 98 – Estudo comparativo entre a extensão do cume P1H e P3H e o modelo P0H, posição de análise P0.

Os modelos 2D são os que apresentaram o maior incremento de velocidades, diferentemente dos modelos 3D que em relação ao morro sem prolongamento do cume (P0H) não mostram grandes variações. Dentre os bidimensionais, destacam-se os modelos com inclinação de 45° com extensão de patamar P1H e P3H. Nestes casos nota-se que, quando o morro forma o patamar no cume, o incremento de velocidades aumenta consideravelmente em relação aos modelos sem o prolongamento do cume. As maiores diferenças são observadas nos modelos: S2-IV (27%), S2-VI (30%) e T2-VI (24%), o que apresentou menor diferença foi o modelo T2-

IV (17%), quando comparados com modelos P0H e demais características mantidas. As comparações, para a posição P0, entre as demais variáveis são apresentadas no apêndice A pelas figuras A.13 a A.24.

O estudo recente de Pirooz e Flay (2018), é o que mais se aproxima dos estudos propostos nesta etapa da tese. Segundo os pesquisadores o modelo 2D com o cume estendido apresenta menores *speed-up* que o modelo padrão do CFD, muito parecido com o modelo sinusoidal. Os resultados numéricos para o modelo padrão CFD tem um valor de, aproximadamente, 2,7 e o modelo com cume estendido em torno de 1,5. A extensão do cume é de, aproximadamente, uma vez a altura do morro. Diferentemente, os resultados expostos pelo gráfico dos modelos sinusoidais 2D (figura 98a), ambas extensões P1H e P3H, apresentaram maiores variações em relação ao modelo sem extensão do cume. Embora não sejam variáveis efetivamente iguais, espera-se que exista um comportamento igual. Porém, podem existir outras variáveis, que não as analisadas, que estejam influenciando no comportamento dos perfis. Uma delas pode ser até a questão de que nesta tese os resultados são experimentais e pelo artigo de Pirooz e Flay (2018) os resultados são numéricos.

As comparações entre as variáveis expostas neste trabalho para a posição de medição P150 são apresentadas no apêndice A, figuras A.25 a A.40. Os gráficos comparativos para as posições de medição P300 e P450 são dispostos nas A.37 a A.48 e A.49 a A.60, respectivamente.

5.1.2.3 Análise de resultados para a segunda etapa da pesquisa: posição S

O comportamento a sotavento do morro foi medido na posição S a meia altura, como na primeira etapa desta pesquisa. Nesta posição nota-se que há uma grande variação de velocidades e até, aproximadamente, a cota Z/H igual a 0,50 as velocidades são em torno de 10% a 20% da velocidade V_{450} , conforme a figura 99. Estas velocidades bem reduzidas em relação ao perfil referência são causadas pelas regiões de recirculação e desprendimento dos vórtices, formando a região da esteira. Segundo os estudos de Pearse et al. (1981) a região da esteira é observada a partir da razão H/L igual a 0,5, que é em torno de 14° , com isso os resultados apresentados nesta seção se apresentam em conformidade com estes autores.

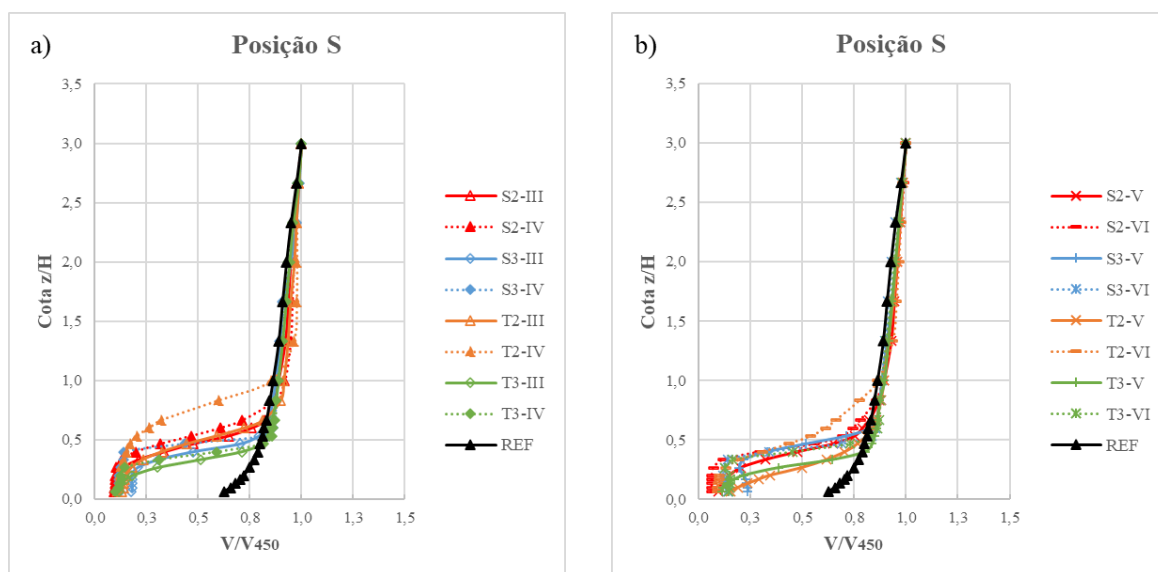


Figura 99 – Resultados experimentais para os morros da segunda etapa, posição de análise S.

Nesta etapa optou-se por apresentar os resultados incluindo os resultados da primeira etapa, assim fica melhor explicado a evolução dos perfis de velocidade para os modelos P0H, P1H e P3H. A comparação entre os ângulos de 20° e 45° são apresentadas pelos gráficos da figura 100, as demais comparações entre dimensionalidade e seção transversal estão expostas nas figuras A.60 a A.68 do Apêndice A.

No geral, as baixas velocidades tendem a persistir por cotas mais altas, para o ângulo de 45° . Além disso, a transição das velocidades ocorre mais bruscamente, enquanto que para o ângulo de 20° ocorre de forma mais gradual. Para os modelos com extensão do cume P1H e P3H os resultados mostram que a presença deste patamar influencia na redução brusca de velocidades até, aproximadamente, a cota Z/H igual a 0,5. Quando não havia a extensão do cume esta redução de velocidades, de forma brusca, era afetada até uma cota Z/H em torno de 0,75.

Os modelos 3D, considerando as variáveis ângulo e seção transversal não apresentaram grandes variações, mostrando-se similares entre si. No entanto, os modelos 2D, com seção transversal triangular notadamente apresentaram variações significativas com modelos estendidos. Os modelos sinusoidais 2D, assim como os modelos 3D não apresentaram grandes variações.

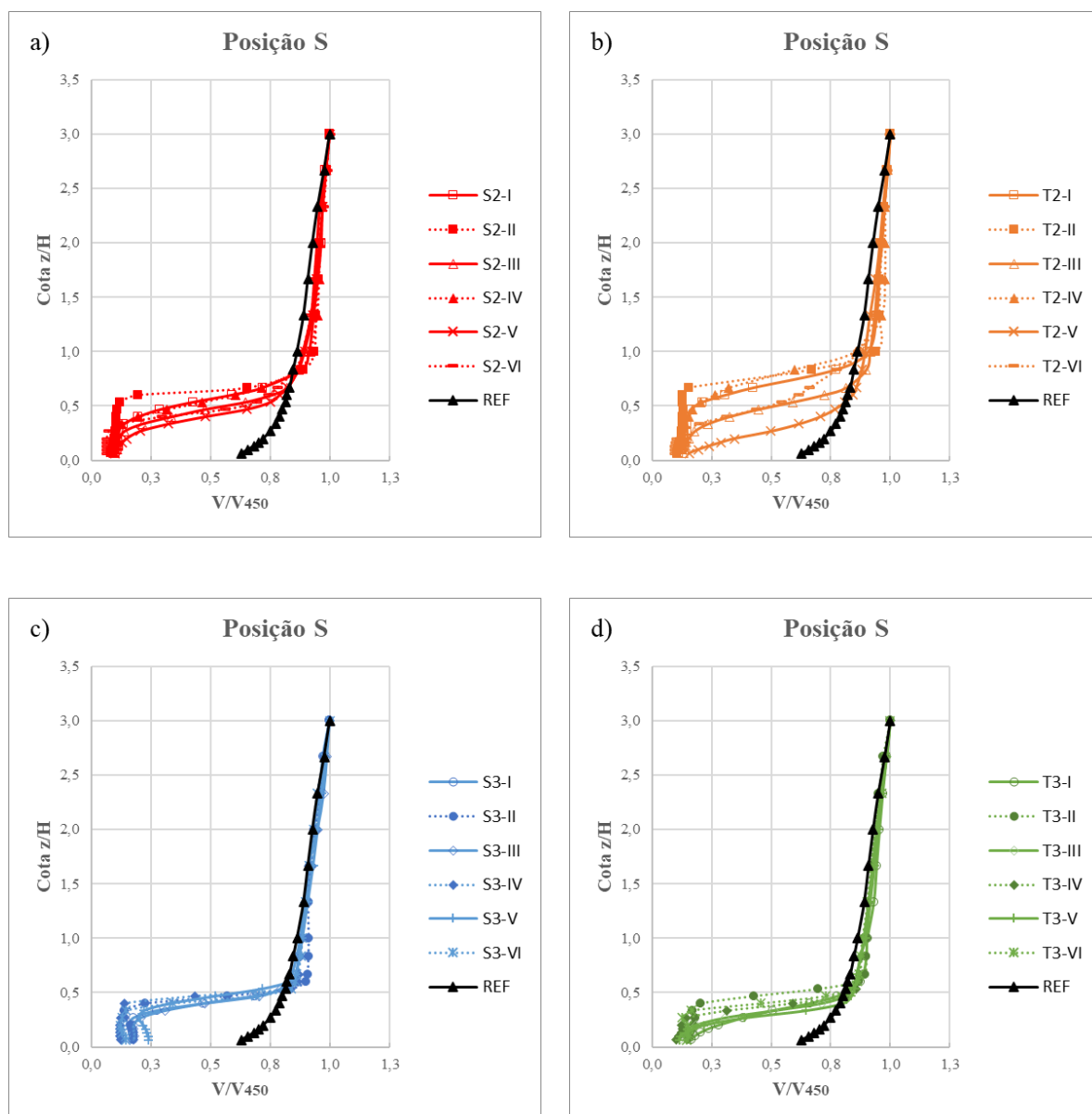


Figura 100 – Estudo comparativo da variável ângulo para a segunda etapa, posição de análise S.

5.1.3 Resultados experimentais e análises para a terceira etapa: morros com patamares intermediários a barlavento

Os resultados experimentais nesta etapa da pesquisa abordam os taludes com patamares intermediários a barlavento, a extensão do patamar superior do talude é de 4H (600 mm). Para esta etapa da pesquisa as variáveis são:

- seção transversal: triangular;
- dimensionalidade: 2D;

- c) ângulo: 20° e 45°;
- d) extensão do cume do morro igual a 4H, onde H é a altura do morro que é igual a 150 mm.
- e) patamares intermediários a barlavento: 1 patamar de 75 mm, 2 patamares de 75 mm, 1 patamar de 150 mm e 2 patamares de 150 mm.

Os resultados experimentais para os modelos triangulares 2D com ângulos de 20° e 45° são apresentados nas figuras 101 a 104. Para os modelos de 20° foi medido apenas a posição P0, para os modelos com ângulo de 45° mediram-se as posições a barlavento e em todo o patamar. A razão pela qual não foram medidos valores para o ângulo de 20° deve-se ao fato, que pelas análises das primeira e segunda etapas o ângulo de 45° apresentou as maiores diferenças em relação à referência, enquanto que o ângulo de 20° as diferenças foram menores.

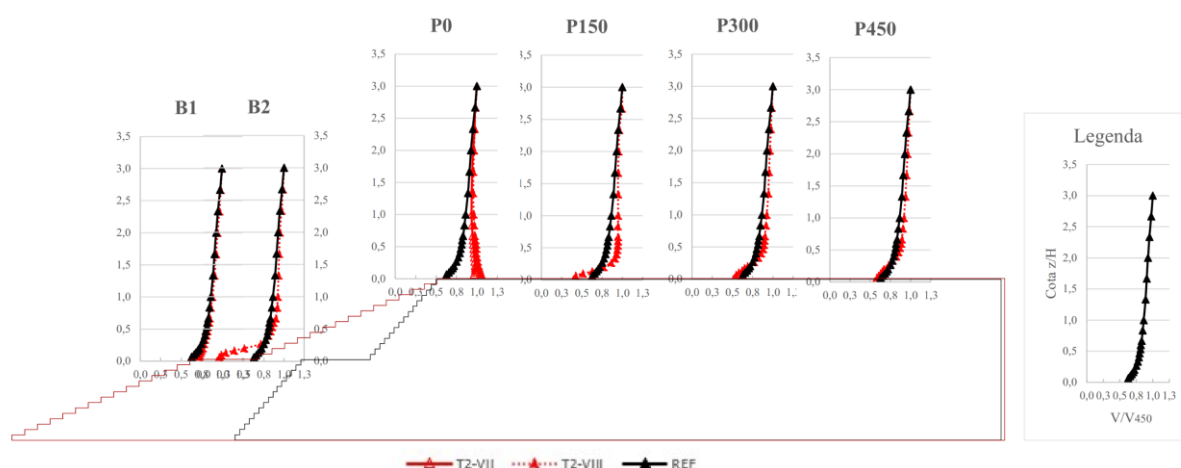


Figura 101 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 1 patamar intermediário de comprimento de 75 mm.

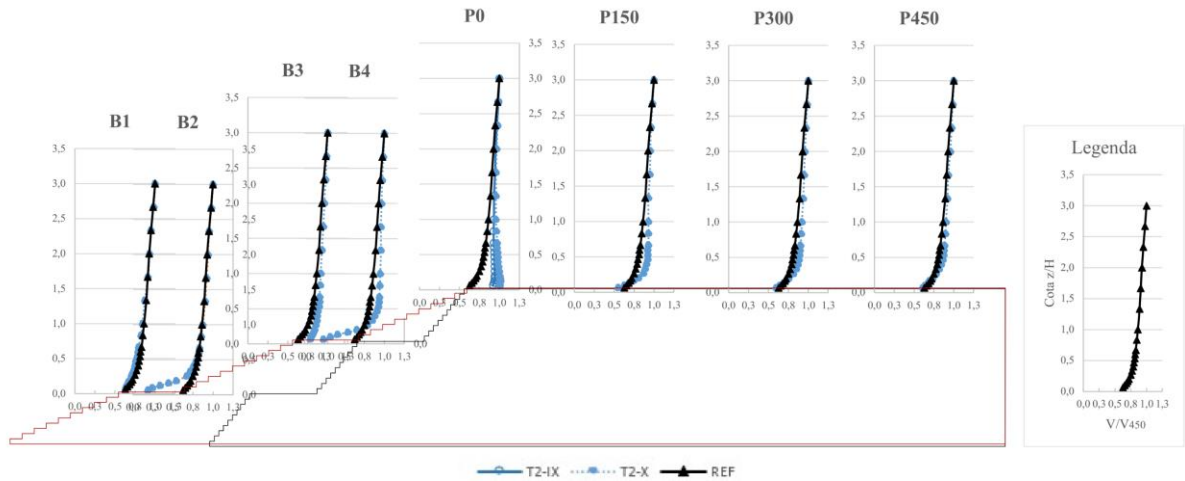


Figura 102 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 2 patamares intermediários de comprimento de 75 mm.

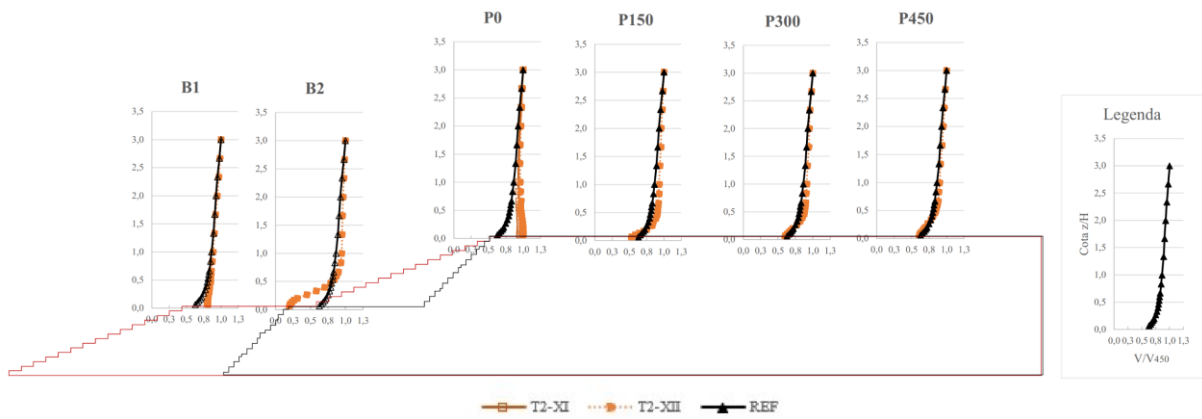


Figura 103 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 1 patamar intermediário de comprimento de 150 mm.

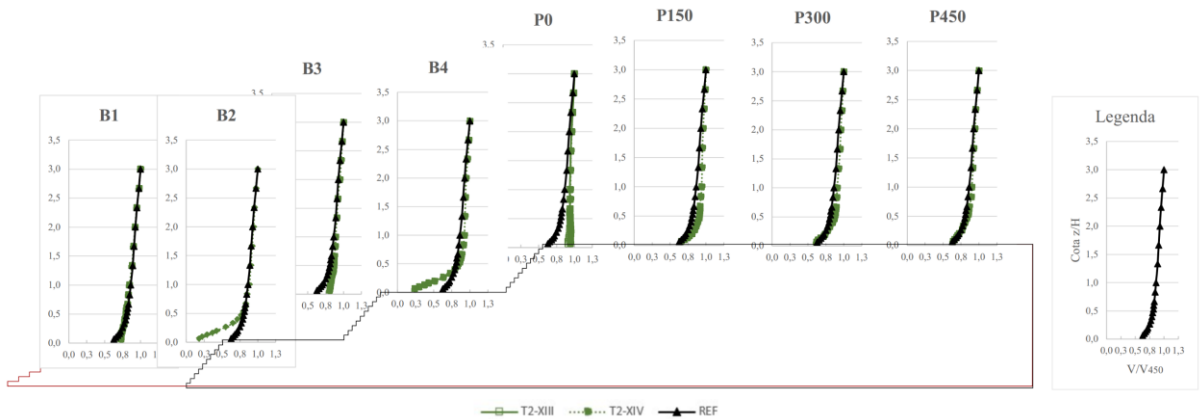


Figura 104 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa com ângulo de 45°, com 2 patamares intermediários de comprimento de 150 mm.

Os pontos localizados a barlavento do cume do talude apresentaram duas situações distintas. Nas medições próximas a bordas, posições B1 ou B1 e B3, podem ser observados pequenos incrementos de velocidade. A outra situação refere-se às medições nas posições B2 ou B2 e B4, dependendo se o talude tem um ou dois patamares intermediários, nestas posições nota-se que há uma redução brusca nas velocidades próximas superfície de medição.

As medições na posição B1, para alturas de 75 mm (quando tem 1 patamar) ou 50 mm (quando tem 2 patamares), apresentam incrementos significativos quando comparados ao perfil referência. No geral estes incrementos foram superiores a 15%, senão o modelo com T2-X que apresentou um valor de -6%, ou seja, menor que a referência. Para este caso em específico pode-se afirmar que esta posição está sendo afetada pelo patamar que está a sotavento. Este efeito é explicado pelo estudo de Sherry et al. (2010), que afirma que a região de recirculação a barlavento de um objeto com a fachada frontal de 90° varia entre $1H$ e $1,2H$ (H altura do objeto). Como neste caso o objeto tem inclinação menor que 90° o comprimento da região de recirculação a barlavento pode ser menor, o que explicaria não haver diminuição para o modelo com o patamar de 150 mm.

Para os modelos que tem dois patamares intermediários, na borda do segundo patamar (posição B3) pode-se observar que em relação a B1 há um aumento deste incremento. Seguindo a análise em direção ao cume do talude, na posição P0 os incrementos são ainda maiores. Na figura 105 são apresentados maiores incrementos em relação ao perfil referência para os modelos da terceira etapa.

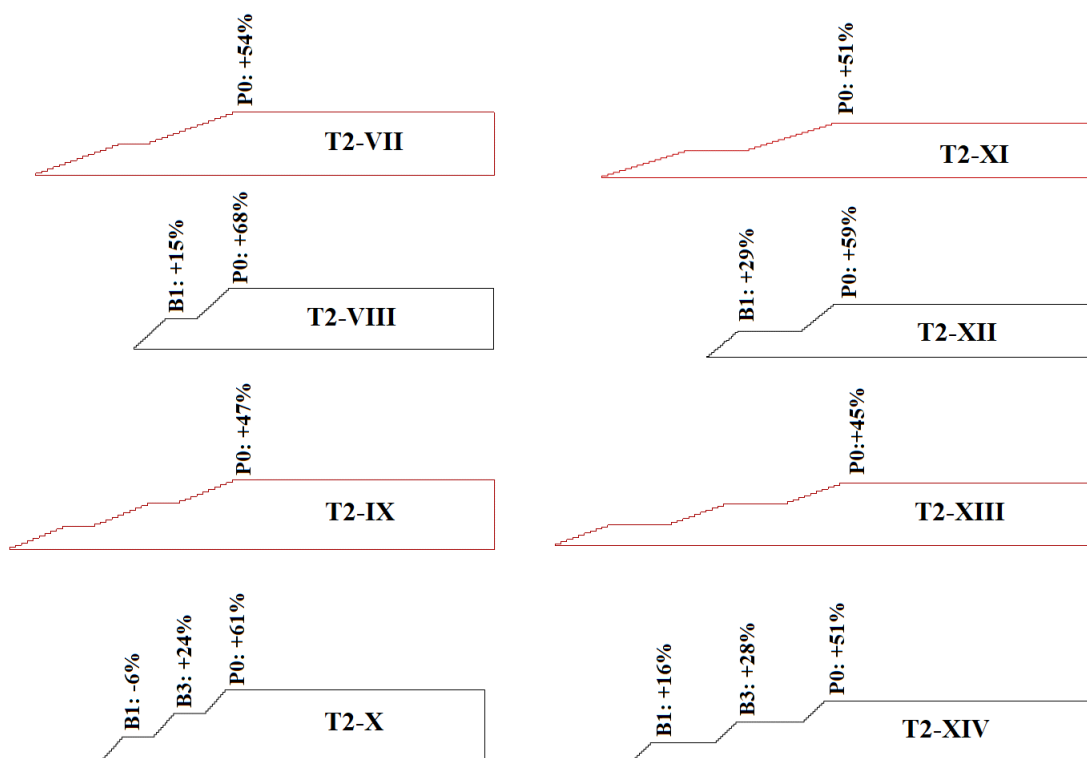


Figura 105 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, incrementos máximos entre os modelos e o perfil referência.

Analisando os incrementos de velocidades para o ponto P0, mostrado na figura 106 a 108, pode-se dizer que comparativamente:

- comparativamente o ângulo de 45° apresenta os maiores incrementos de velocidades em relação aos modelos com ângulo de 20°;
- os modelos com apenas 1 patamar intermediário apresentam maiores incrementos que os modelos com 2 patamares intermediários, considerando as demais variáveis iguais;
- em relação ao comprimento do patamar intermediário pode-se observar que o menor comprimento, ou seja, 75 mm apresenta os maiores incrementos de velocidades

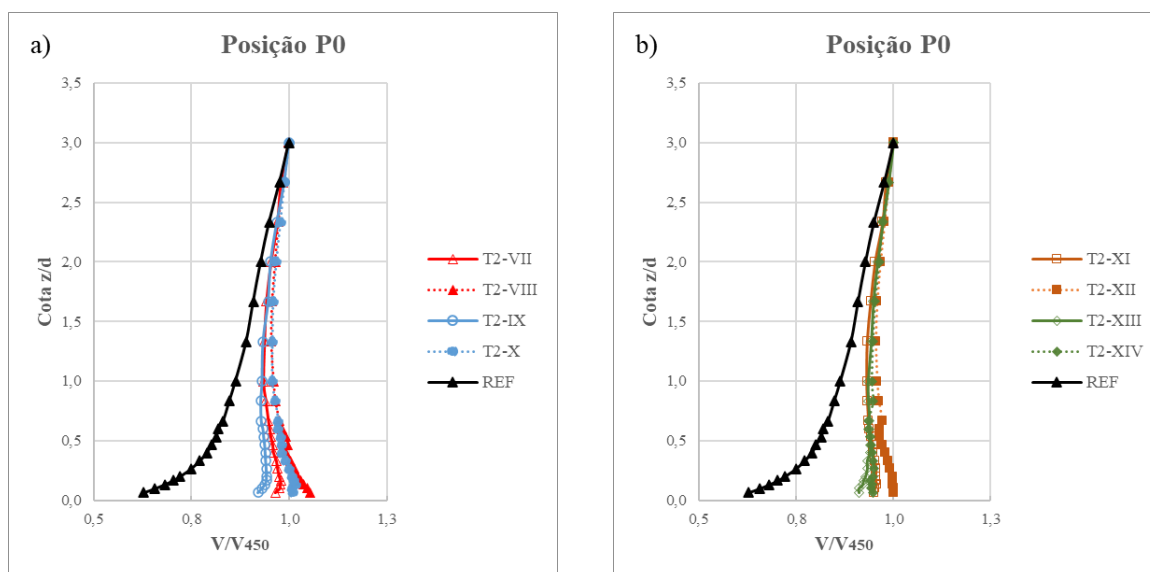


Figura 106 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, comparativos entre os modelos com comprimento de talude de 75 mm (a) e com 150 mm (b).

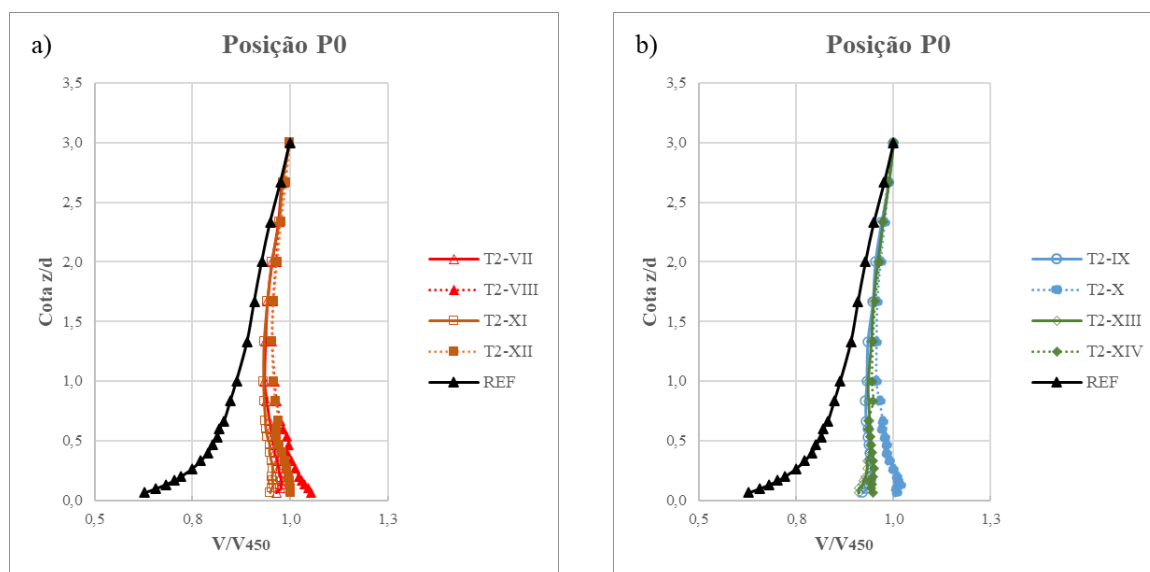


Figura 107 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, comparativos entre os modelos com mesmo número de patamares intermediários, um patamar (a) e dois patamares (b).

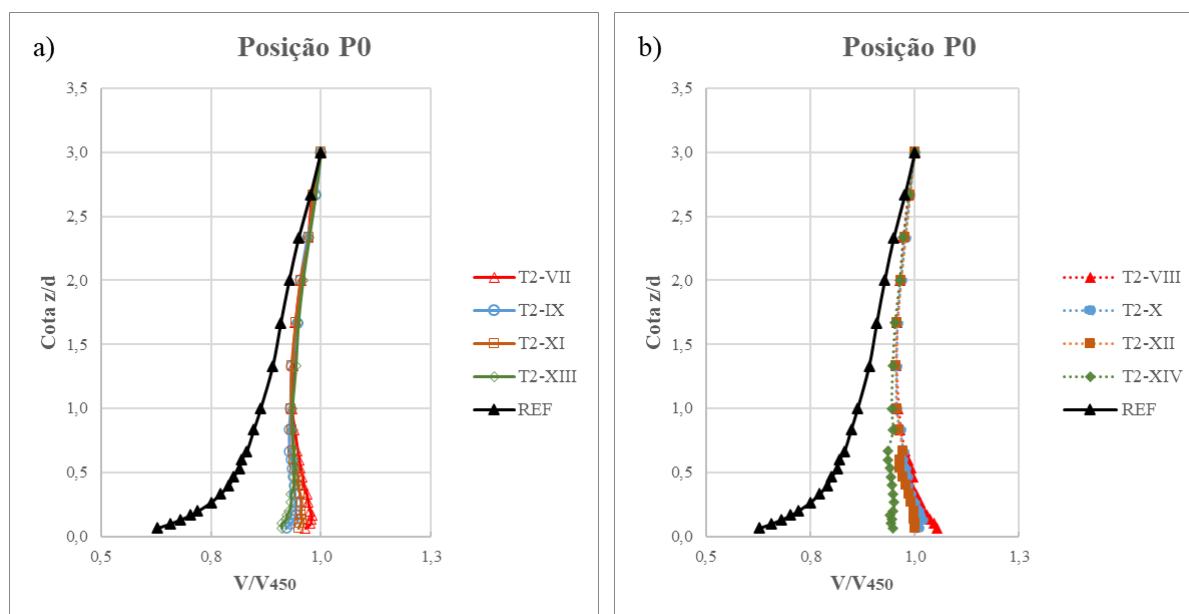


Figura 108 – Resultados experimentais para taludes da terceira etapa, comparativos entre os modelos para o mesmo ângulo, 20° (a) e 45°(b).

Na literatura o estudo que introduz patamares intermediários é dos pesquisadores Carpenter e Locke (1999). Os patamares intermediários se localizavam acima da linha natural do modelo, como se fosse um aterro, diferente dos estudados por esta tese que representa um corte, com encostas de mesma inclinação acima e abaixo do patamar. Comparativamente em relação ao morro sem patamar os autores observaram que houve diminuição nas velocidades no cume do morro e um aumento significativo na turbulência.

5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM AS NORMAS ESTUDADAS

Neste item serão apresentados os resultados e análises entre os dados experimentais e as normas estudadas. As normas que foram analisadas são: NBR 6123, ASCE 7-10, AS/NZS 1170.2, NBCC, EUROCODE, AIJ. Dentre as normas analisadas, em nenhuma delas as formulações são diferentes conforme a seção transversal do morro. Assim, os resultados para as seções transversais sinusoidal e triangular estudadas tem o mesmo resultado analítico. A dimensionalidade dos morros 2D e 3D é diferenciada na formulação das normas ASCE 7-10 e NBCC. Pelos resultados experimentais apresentados ao longo do capítulo 5.1 se pode observar perfis de velocidades diferentes entre morros e taludes. Esta diferenciação é considerada pelas

normas ASCE 7-10, NBCC e AIJ por coeficientes distintos. O EUROCODE apresenta formulações distintas para os pontos a sotavento de morros e a sotavento taludes, para pontos a barlavento até o cume a formulação é a mesma, desta forma o *speed-up* no cume é igual. Dentre as normativas estudadas as formulações da NBR 6123 e AS/NZS 1170.2 são as mais simplificadas e não consideram variáveis de dimensionalidade, diferenciação entre morro e talude.

5.2.1 Terreno Plano

Inicialmente, para avaliar a coerência entre os modelos analíticos realizou-se a análise de terreno plano, ou seja, foram obtidos os perfis de velocidades de vento sem topografia e submetidos ao mesmo tipo de vento. Para tanto, submeteu-se todas as formulações a um vento com características da Norma Brasileira NBR 6123 para um terreno de categoria II, visto que as velocidades básicas das normas analisadas consideram o tipo de terreno igual a essa categoria. Na figura 109 são apresentados os dados da comparação entre as normas, o eixo das abcissas está normalizado pela velocidade de referência na cota 450 m.

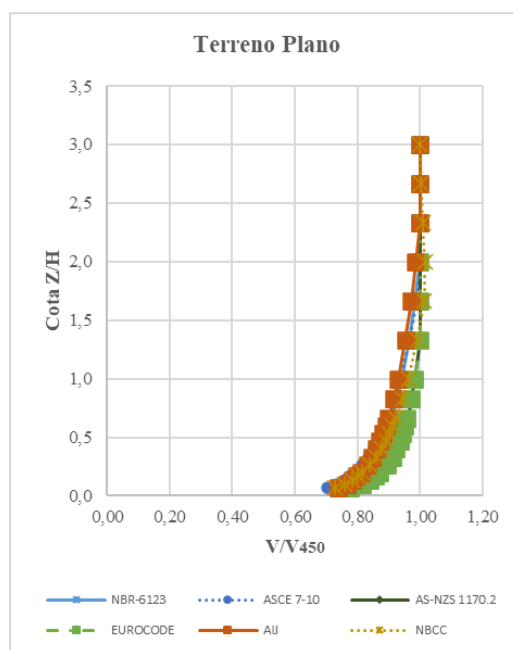


Figura 109 – Perfil de velocidades normalizadas para terreno plano categoria II.

Os resultados da comparação entre as normas, para um terreno plano e categoria II, mostram que existe pequenas diferenças entre os perfis para terreno plano. Diferentemente do esperado, já que em teoria seriam exatamente as mesmas condições. Entretanto, como cada norma leva

em consideração as condições de cada país, alguns parâmetros podem ser diferentes o que ocasiona valores diferentes para o perfil de velocidades. Estas diferenças também foram evidenciadas pelos estudos de Scotton (2016) e Mattuella (2012), cujas normas analisadas entre estes dois estudos foram as mesmas desta tese, com exceção de alguma atualização na versão das normas.

O quadro 23 mostra os valores das velocidades normalizadas para a altura de 10 m e a diferença percentual que as normas apresentam em relação a norma brasileira. A norma americana ASCE é a que apresenta maior diferença de -5,8% e a que tem menor diferença é a AIJ -1,3% menor que a NBR 6123.

Quadro 23 – Valores de V/V_{450} a uma altura de 10 m e a diferença em porcentagem em relação a NBR 6123.

VALOR	NBR	ASCE	AS-NZS	EURO	AIJ	NBCC
V/V_{450}	0,749	0,706	0,775	0,776	0,739	0,730
Diferença [%]	0,0%	-5,8%	3,5%	3,6%	-1,3%	-2,6%

As velocidades apresentadas na figura 109 e as diferenças pelo quadro 23, mostram que há uma pequena discrepância entre as normativas. Para esta cota pela categoria II não deveria ter diferenças. Porém, como comentado cada formulação tem características próprias que podem estar influenciando.

5.2.2 Comparativo entre os modelos experimentais e resultados analíticos

Os resultados analíticos foram calculados pelas normas NBR 6123 (ABNT, 1988), Eurocode 1 (CEN-TC, 2010), AIJ (AIJ, 2004), NBCC (NRCC, 2010), AS/NZS (AS/NZS, 2011), ASCE (ASCE, 2010). Para calcular as velocidades e depois normalizá-las, todas as características foram consideradas e equalizadas em relação à NBR 6123. A apresentação dos resultados analíticos comparados com os experimentais será mostrada por etapa de pesquisa. Como apenas as normas ASCE e NBCC apresentam diferenças entre modelos bidimensionais e tridimensionais estes serão indicados separadamente na figura. Para os modelos da primeira etapa o comparativo entre os resultados experimentais e analíticos são apresentados nas figuras 110 a 112.

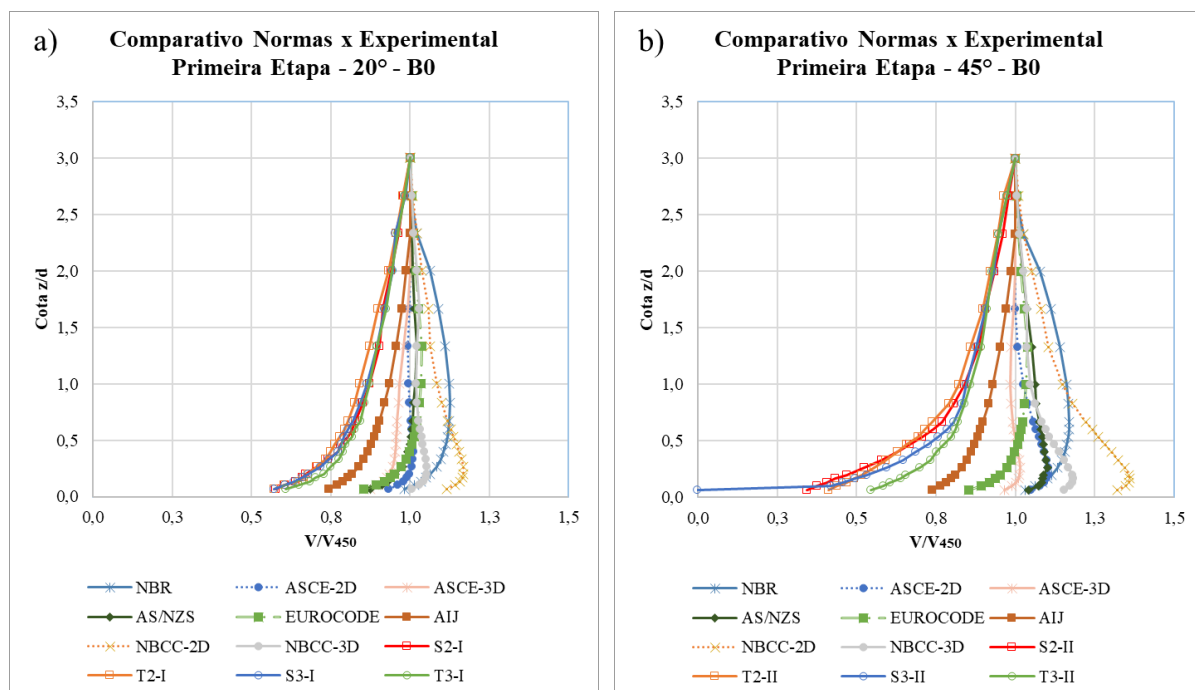


Figura 110 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da primeira etapa, posição B0.

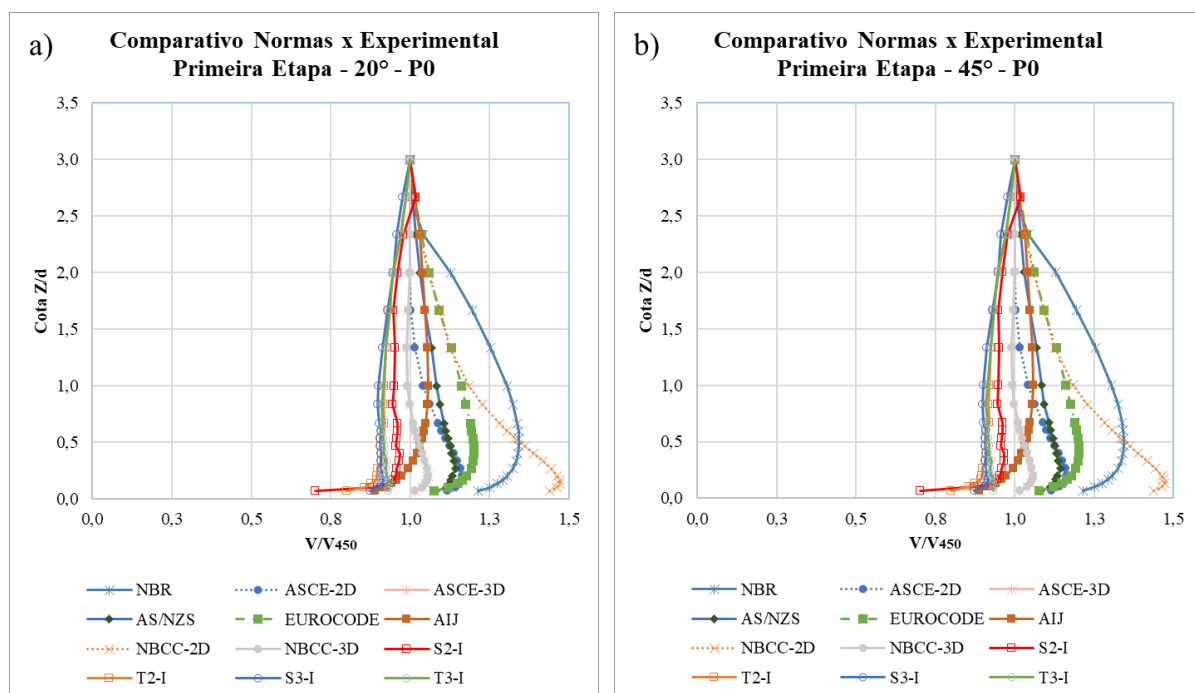


Figura 111 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da primeira etapa, posição P0.

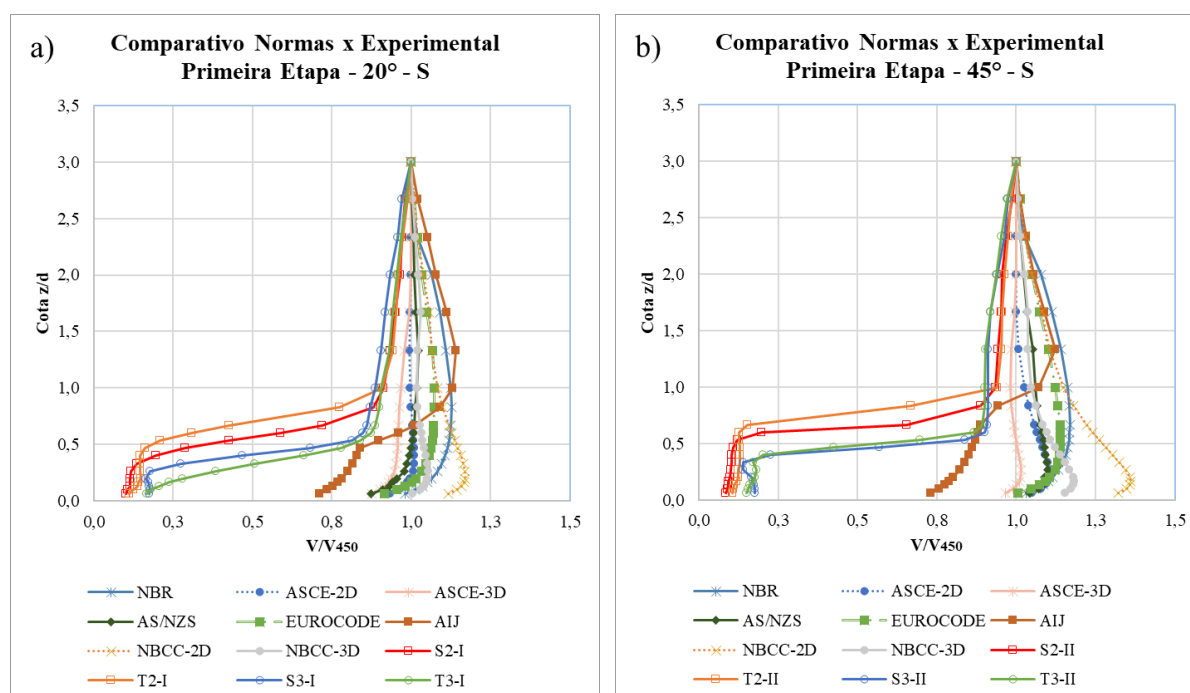


Figura 112 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da primeira etapa, posição S.

As formulações analíticas tendem a ser mais conservadoras que os resultados obtidos em ensaios experimentais, para os casos das figuras 110 a 112 grande parte das normativas superestimaram as velocidades. Dentre as normas estudadas a Japonesa (AIJ) é a única que considera o efeito da esteira, onde podem ser observadas velocidades muito reduzidas até a cota normalizada $z/d = 1$, conforme apresentam as figuras 109a e 109b.

Os resultados analíticos para a posição a barlavento não apresentam redução das velocidades como exposto pelos dados experimentais nos gráficos da figura 110. Ao contrário disso, as normas apresentam incrementos de velocidades para esta região. Segundo os dados experimentais, apresentado nos gráficos da figura 111, no cume são observados os maiores incrementos de velocidade e os resultados obtidos pelas formulações analíticas superestimam estes valores. A sotavento do morro as normativas não reproduzem o comportamento do escoamento do vento, senão a norma Japonesa AIJ. Embora a norma Japonesa reproduza o efeito da esteira, ainda assim é superestimado como os demais pontos de análise.

A divergência entre as formulações, como já exposto para o terreno plano, ficam ainda mais evidentes quando são parametrizadas pelas variáveis estudadas. Ngo e Letchford (2008), ao estudar as normas Americana, Australiana/Neo-Zelandesa e Japonesa explanaram sobre as divergências encontradas entre as formulações corroborando com os resultados apresentados nesta tese.

Segundo as formulações apresentadas, os morros são definidos por uma encosta ascendente e logo em seguida começa a encosta descendente. Os taludes são definidos pela encosta ascendente que terminam em uma parte plana, ou platô, com inclinação menor a 5% ou 3° , dependendo da norma. Esta parte plana dos taludes não tem limitação nem mínima e nem máxima. A partir disso, são definidos os parâmetros que serão considerados nos cálculos.

Os modelos experimentais da segunda parte desta pesquisa foram definidos como morros 2D e 3D, para ambas as extensões do cume. Foi assim definido por apresentar as encostas ascendente e a descendente. Para os modelos 3D, ambas extensões do cume não apresentaram grandes modificações no perfil de velocidades do vento. De encontro aos modelos tridimensionais, os modelos 2D apresentaram perfis de velocidades que indicam estar em uma região de recirculação, principalmente para a posição P0 e ângulo 45° . Pelas normativas, como não há limitação a sotavento do vento, estes morros 2D por apresentarem o platô, poderiam ser considerados um talude. Quando observados os perfis de velocidade da terceira etapa, na posição P150, nota-se que as quatro primeiras cotas apresentam uma pequena redução de velocidades, porém não divergem tanto do perfil referência como as dos modelos 2D com extensão de cume. Isto indica que a conformação a sotavento do morro influencia nos perfis de velocidades ao longo da topografia.

Considerando as limitações das formulações para o cálculo a barlavento e a sotavento para a segunda e terceira etapas, serão analisados apenas os perfis analíticos no platô e para os modelos 2D. Os modelos analíticos da segunda e terceira etapas foram calculados como taludes 2D.

Cabe salientar que tanto para os modelos com extensão do cume como os modelos com patamares intermediários não apresentam formulações analíticas específicas. As formulações são para modelos bem simplificados conforme descrito no capítulo 3. Porém, é importante para o entendimento de quão divergente ou não é aquela normativa do modelo em análise.

No geral, os resultados analíticos mostram valores superiores aos experimentais assim como nas análises anteriores. Porém a diferença tende a diminuir quanto mais a sotavento a posição de análise estiver da borda do talude.

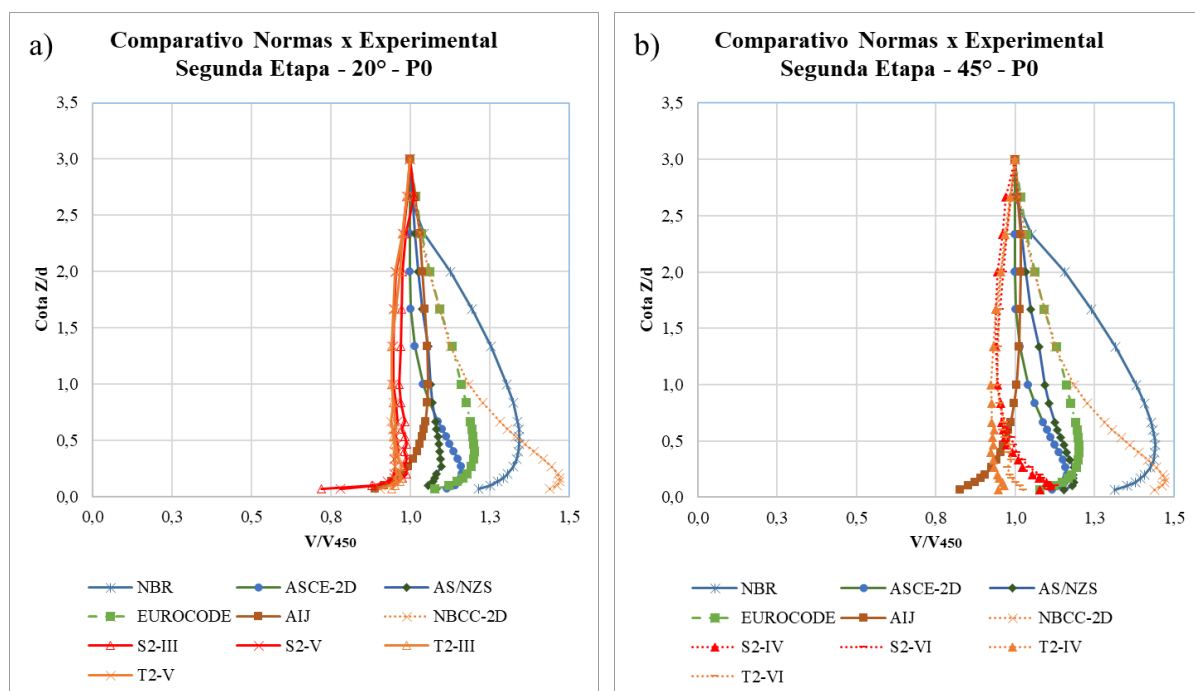


Figura 113 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os ângulos 20° (a) e 45°(b), posição P0.

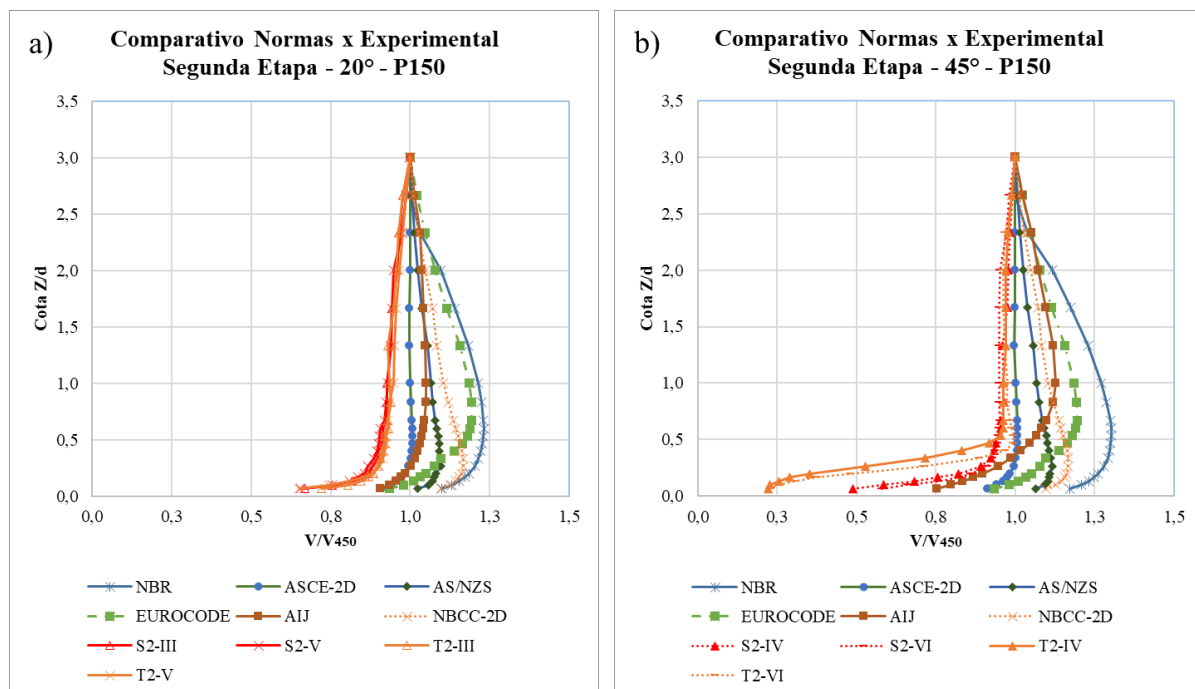


Figura 114 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os ângulos 20° (a) e 45°(b), posição P150.

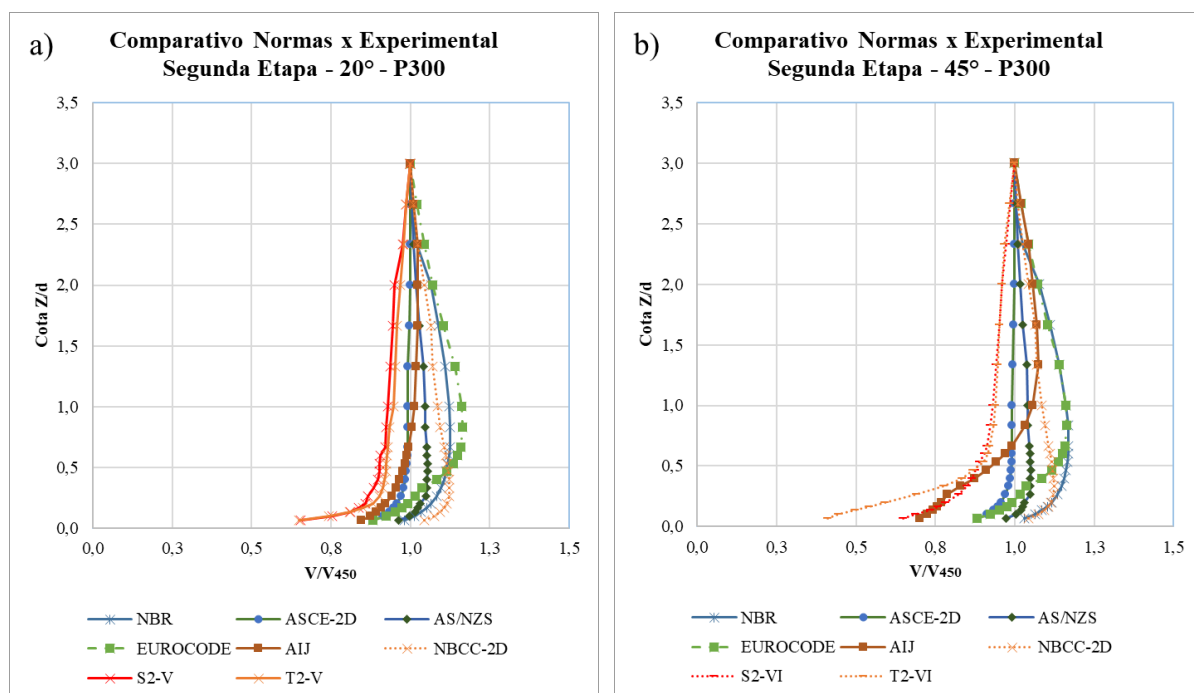


Figura 115 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os modelos 20° (a) e 45°(b), posição P300.

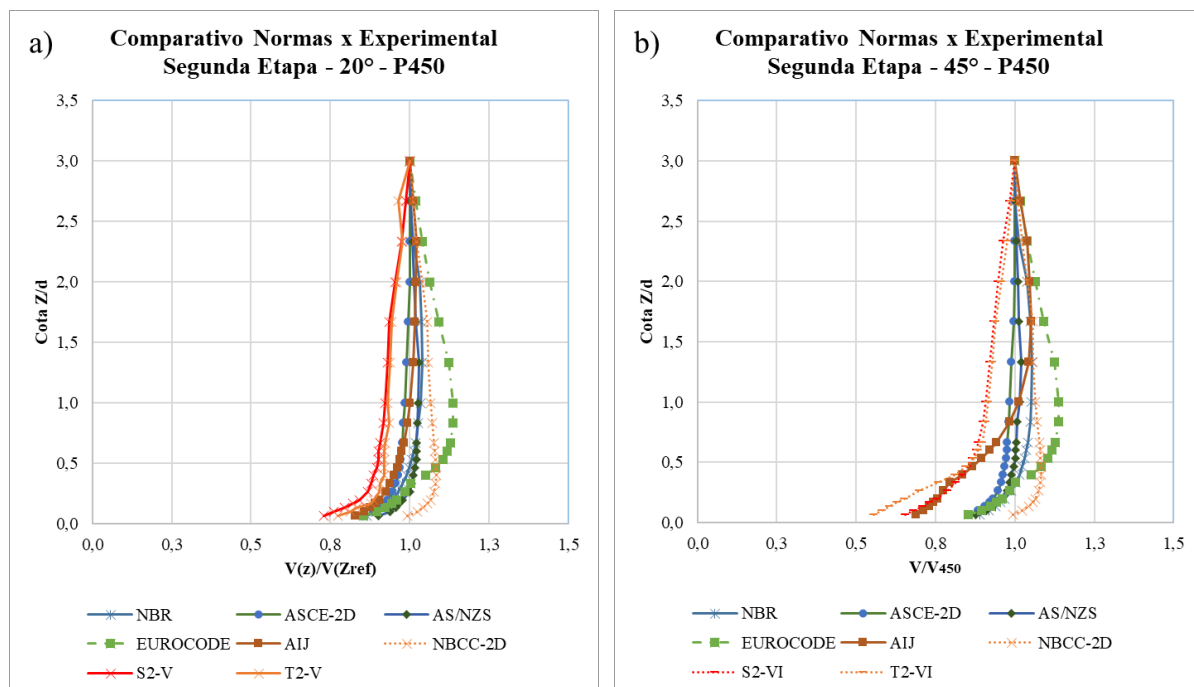


Figura 116 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da segunda etapa para os modelos 20° (a) e 45°(b), posição P450.

O comparativo entre os resultados experimentais e analíticos para a terceira etapa da pesquisa, que é modelado com patamares intermediários pode ser visualizado nas figuras 117 a 120. Para o modelo com ângulo de 20° foram obtidas medições no platô apenas para o ponto P0. Para o ângulo de 45° as medições no platô foram realizadas nos pontos P0, P150, P300 e P450.

Nesta etapa, no geral, as normativas mantiveram a mesma tendência de superestimar as velocidades, que pode ser visualizado nas posições anteriormente analisadas. A norma Japonesa em cotas próximas a superfície apresentou valores ligeiramente inferiores para o modelo de 20° . Dentre as normas é a que mais se aproxima dos perfis experimentais, mesmo que de forma idealizada sem considerar a presença de patamares intermediários.

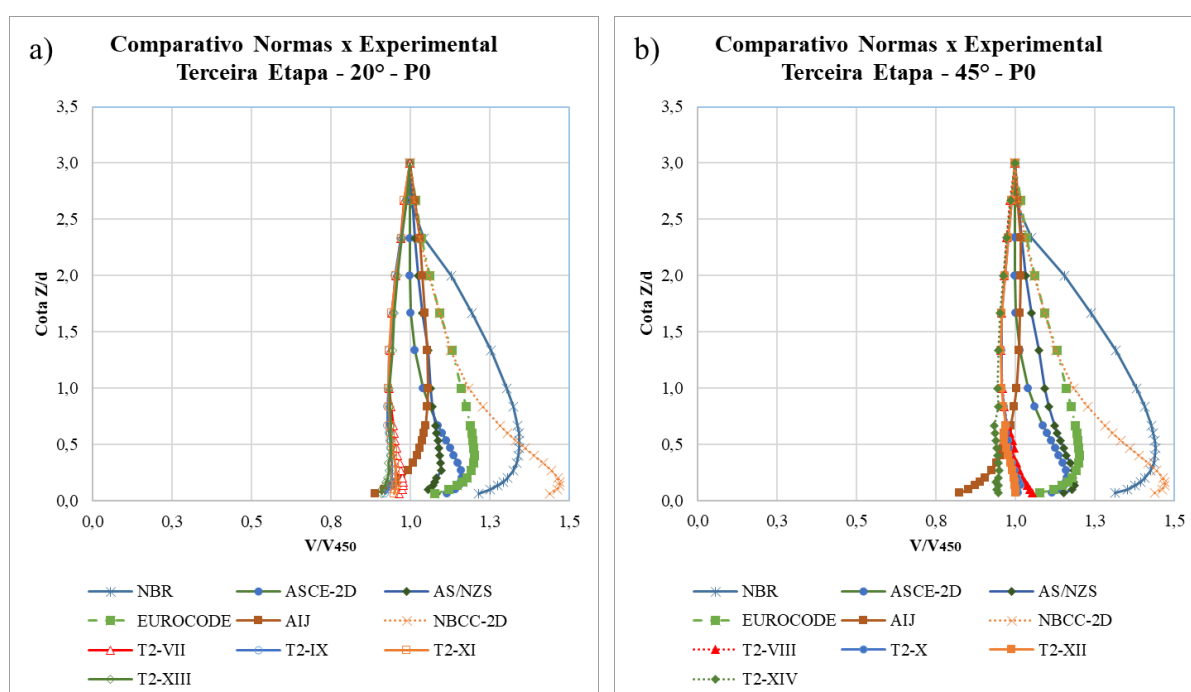


Figura 117 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 20° (a) e 45° (b), posição P0.

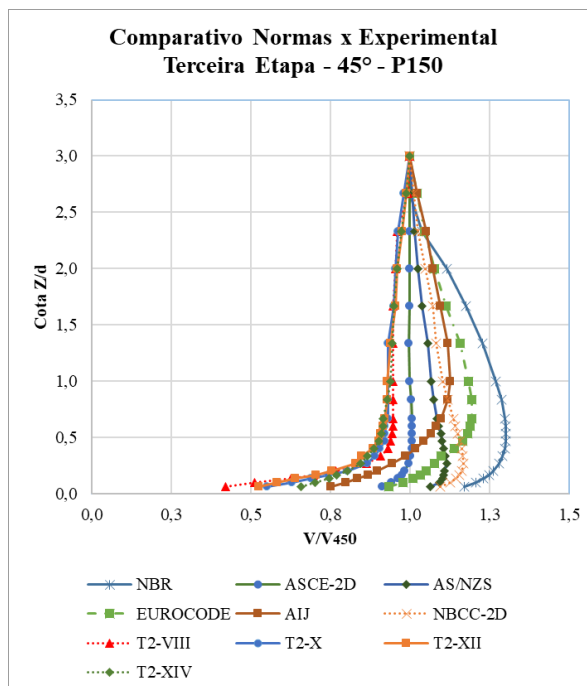


Figura 118 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 45°, posição P150.

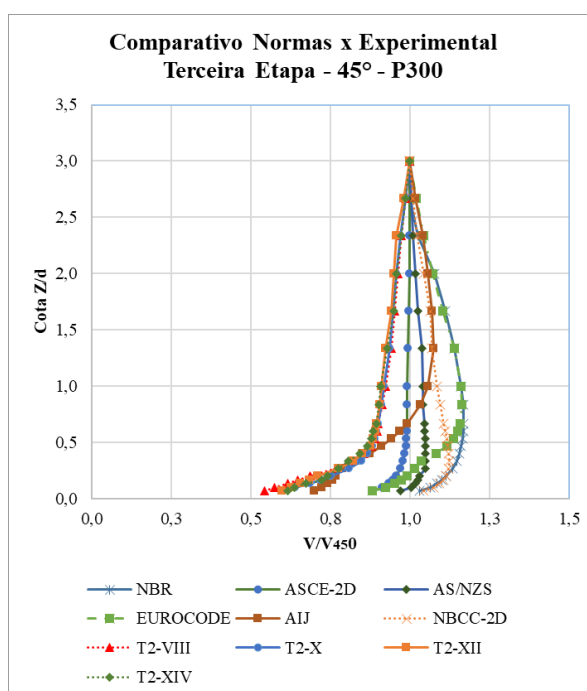


Figura 119 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 45°, posição P300.

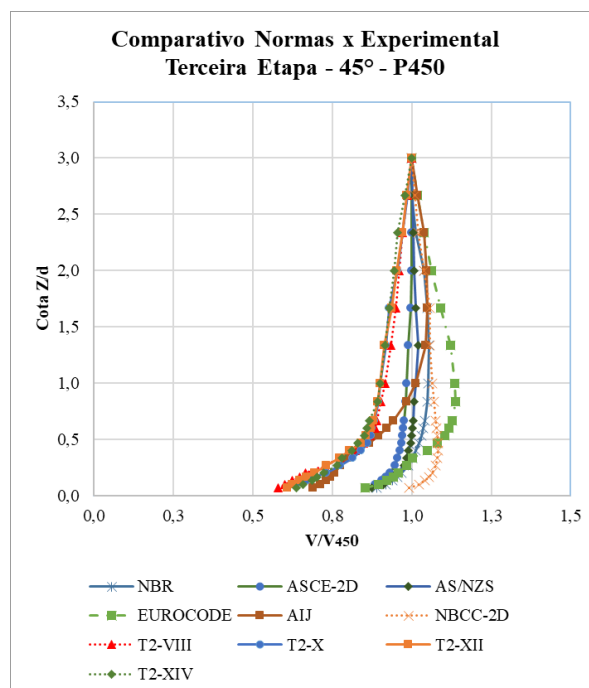


Figura 120 – Comparativo analítico e experimental para os modelos da terceira etapa para os modelos 45°, posição P450.

5.3 PROPOSIÇÃO DE FORMULAÇÃO PARA O FATOR TOPOGRÁFICO DA NBR 6123

A proposição de uma nova formulação para o fator topográfico para a NBR 6123 foi desenvolvida de forma empírica pela análise das normas apresentadas no capítulo 3. Trata-se de uma proposta bem distinta da atual formulação da NBR 6123, e considera três parâmetros básicos, altura do morro, comprimento a barlavento e cota.

Durante o desenvolvimento da tese, todas análises foram realizadas pelas velocidades do perfil. Para a proposição de formulação do fator topográfico, optou-se por tratar os dados e obter o fator topográfico. Esta proposição considera a dimensionalidade da topografia dividindo em três grupos, seguindo a mesma divisão das normas Americana (ASCE) e Canadense (NBCC), conforme descritas nas alíneas abaixo:

- a) Morros tridimensionais;
- b) Morros bidimensionais;
- c) Taludes bidimensionais.

As normas Japonesa (AIJ) e Européia (EUROCODE) apenas diferem morros de taludes, a brasileira (NBR 6123) e a Australiana-Neozelandesa (AS/NZS) não fazem nenhuma distinção. No decorrer dos estudos sobre as normas apresentadas no capítulo 3 desta tese observou-se que algumas relações são importantes para a caracterização do fator topográfico, que são: z/L , d/L ou H/L e x/L . Estas relações estão presentes na maioria das normas estudadas, dentre elas a NBR 6123 (1988) é a mais simplista pois apresenta a relação z/d e indiretamente pela tangente de θ considera a relação d/L . Além disso, ao longo das análises, observou uma diferença nos dados experimentais entre modelos de morros-3D, morros-2D e taludes-2D e se optou por inserir na proposição de formulação estes parâmetros. Com isso, a proposição para a nova formulação da NBR 6123 é descrita pela equação 63.

$$S_1 = 1 + \left[A \cdot \left(1 - \frac{z}{3 \cdot L} \right) \cdot \left(\frac{B \cdot d}{L} \right)^{0,5} \cdot e^{\left(\frac{-C \cdot z}{L} \right)} \right] \cdot e^{\left(\frac{D \cdot |x|}{L} \right)} \quad (\text{equação 63})$$

Onde:

S_1 = fator topográfico, adimensional;

z = cota medida a partir da superfície, em m;

L = comprimento horizontal a barlavento, em m;

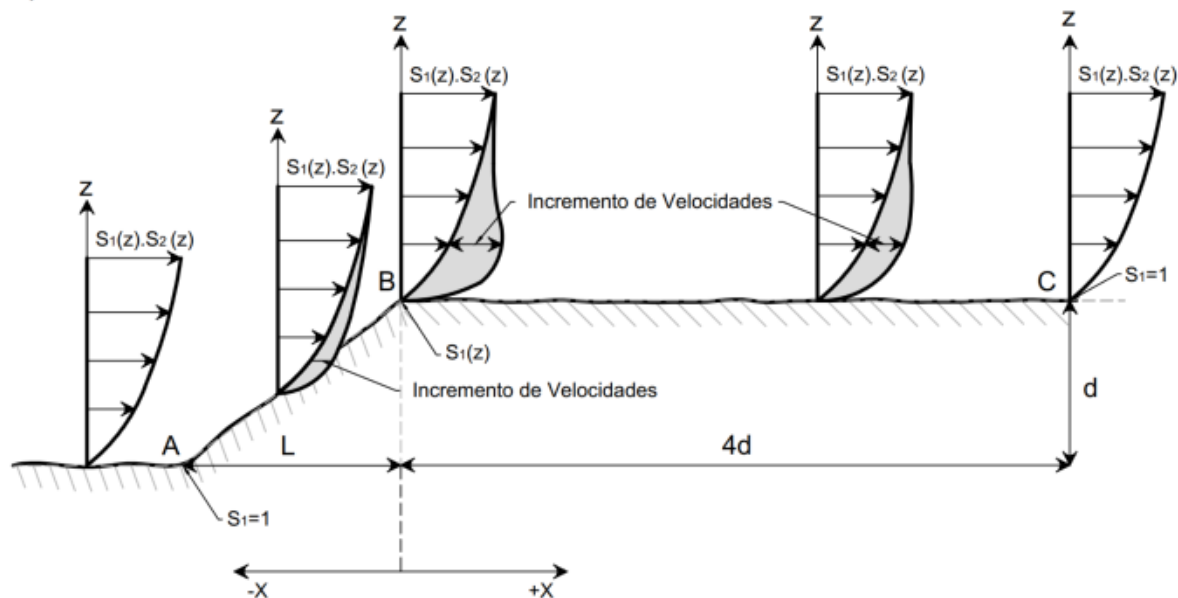
d = altura do morro, em m

A, B, C, D = coeficientes, adimensionais (quadro 24).

Quadro 24 – Coeficientes A, B, C e D para a proposição de nova formulação da NBR 6123.

	A	B	C	D
3D-Morro	1,05	0,5	4	1
2D-Morro	1,1	0,6	3	1
2D-Talude	1,2	0,6	1,5	2,5

a) talude



a) morro

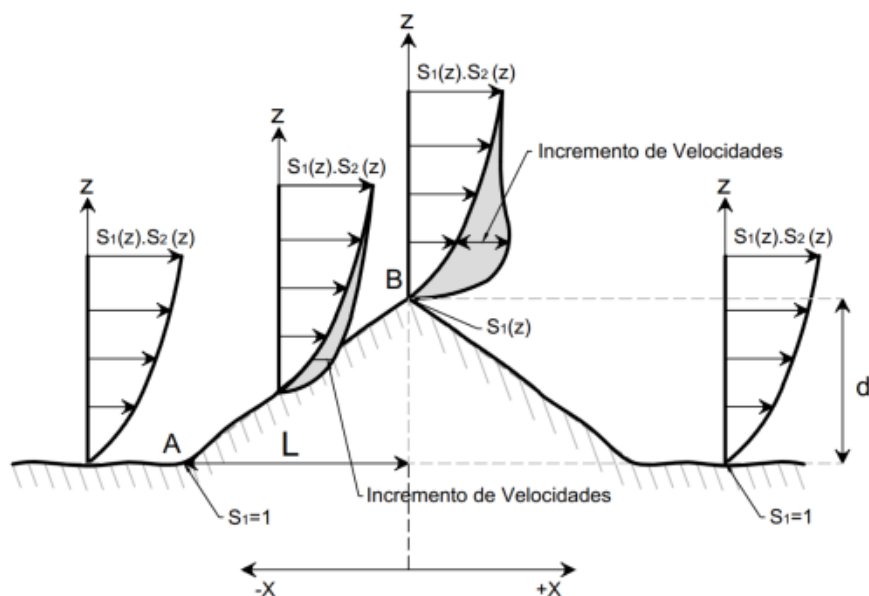


Figura 121 – Representação esquemática dos parâmetros para o fator topográfico para a proposição da NBR 6123.

A tabela 1 apresenta alguns dados experimentais desta tese e da dissertação Scotton (2016). Nas tabelas 1 a 3 são apresentados os fatores topográficos para os grupos: 2D-Morros, 3D-Morros e 2D-Taludes.

Tabela 1 – Fatores topográficos experimentais para 2D-Morros.

Cota z (m)	2D Morros			
	S2-I	S2-II	T2-I	T2-II
10	1,12	1,35	1,27	1,31
15	1,33	1,40	1,30	1,26
20	1,37	1,34	1,28	1,22
25	1,35	1,30	1,27	1,19
30	1,33	1,27	1,24	1,16
40	1,28	1,20	1,20	1,11
50	1,25	1,17	1,18	1,12
60	1,22	1,15	1,15	1,09
70	1,19	1,12	1,14	1,10
80	1,18	1,11	1,12	1,08
90	1,17	1,09	1,11	1,06
100	1,16	1,08	1,11	1,06
125	1,12	1,06	1,08	1,04
150	1,10	1,05	1,07	1,03
200	1,07	1,02	1,04	1,02
250	1,04	1,02	1,03	1,02
300	1,04	1,02	1,02	1,01
350	1,03	1,01	1,02	1,02
400	1,04	1,00	1,01	1,01
450	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 2 – Fatores topográficos experimentais para 3D-Morros.

Cota z (m)	3D Morros			
	S3-I	S3-II	T3-I	T3-II
10	1,39	1,45	1,48	1,43
15	1,37	1,38	1,42	1,35
20	1,34	1,31	1,37	1,29
25	1,30	1,26	1,33	1,24
30	1,27	1,22	1,29	1,20
40	1,21	1,17	1,23	1,16
50	1,18	1,13	1,20	1,12
60	1,15	1,10	1,16	1,10
70	1,13	1,08	1,15	1,08
80	1,11	1,07	1,13	1,06
90	1,11	1,06	1,11	1,06
100	1,08	1,04	1,10	1,04
125	1,06	1,03	1,07	1,03
150	1,04	1,03	1,06	1,03
200	1,02	1,02	1,04	1,00
250	1,02	1,01	1,03	1,01
300	1,02	1,01	1,02	1,01
350	1,01	1,01	1,02	1,00
400	1,00	1,01	1,01	1,01
450	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 3 – Fatores topográficos experimentais para 2D-Taludes

Cota z (m)	2D Taludes							
	T2-VII	T2-VIII	T2-IX	T2-X	T2-XI	T2-XII	T2-XIII	T2-XIV
10	1,54	1,68	1,47	1,51	1,51	1,59	1,45	1,51
15	1,49	1,59	1,42	1,45	1,45	1,52	1,39	1,43
20	1,43	1,52	1,38	1,41	1,41	1,47	1,35	1,39
25	1,39	1,46	1,34	1,36	1,36	1,42	1,31	1,34
30	1,35	1,42	1,31	1,33	1,33	1,38	1,29	1,32
40	1,29	1,35	1,26	1,27	1,27	1,32	1,24	1,27
50	1,25	1,30	1,22	1,23	1,23	1,28	1,21	1,23
60	1,21	1,26	1,19	1,20	1,20	1,24	1,19	1,20
70	1,20	1,24	1,17	1,18	1,18	1,21	1,17	1,18
80	1,17	1,22	1,15	1,16	1,16	1,19	1,15	1,15
90	1,16	1,20	1,14	1,15	1,15	1,18	1,15	1,14
100	1,14	1,17	1,12	1,13	1,13	1,17	1,13	1,12
125	1,11	1,14	1,10	1,10	1,10	1,14	1,10	1,12
150	1,08	1,11	1,08	1,08	1,08	1,11	1,08	1,09
200	1,05	1,07	1,05	1,05	1,05	1,07	1,06	1,06
250	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04	1,05	1,04	1,05
300	1,03	1,04	1,03	1,03	1,03	1,04	1,03	1,04
350	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,02
400	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
450	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Os gráficos das figuras 122, 123 e 124, para o ângulo de 20° (a) e de 45° (b), apresentam o comparativo entre os fatores topográficos em função da cota para os grupos 2D Morros, 3D Morros e 2D Taludes, respectivamente. As diferenças percentuais entre os fatores topográficos para os grupos 2D Morros, 3D Morros e 2D Taludes são apresentados nas tabelas 4 a 6, respectivamente.

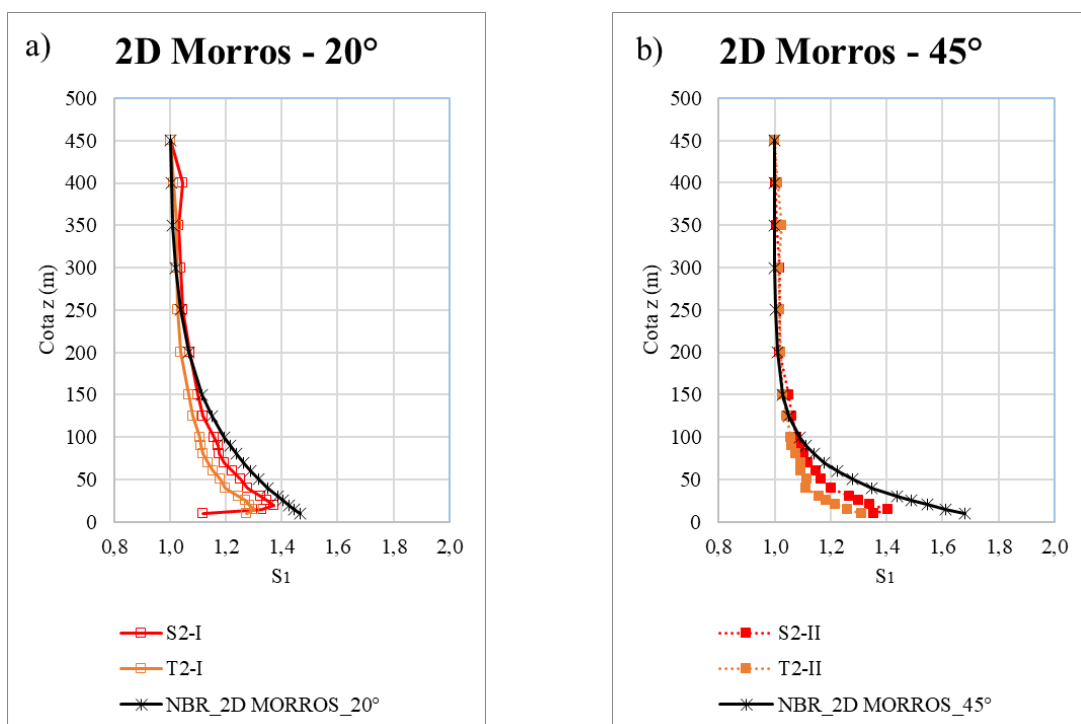


Figura 122 – Comparativo experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D Morros, para o ângulo de 20° (a) e de 45° (b).

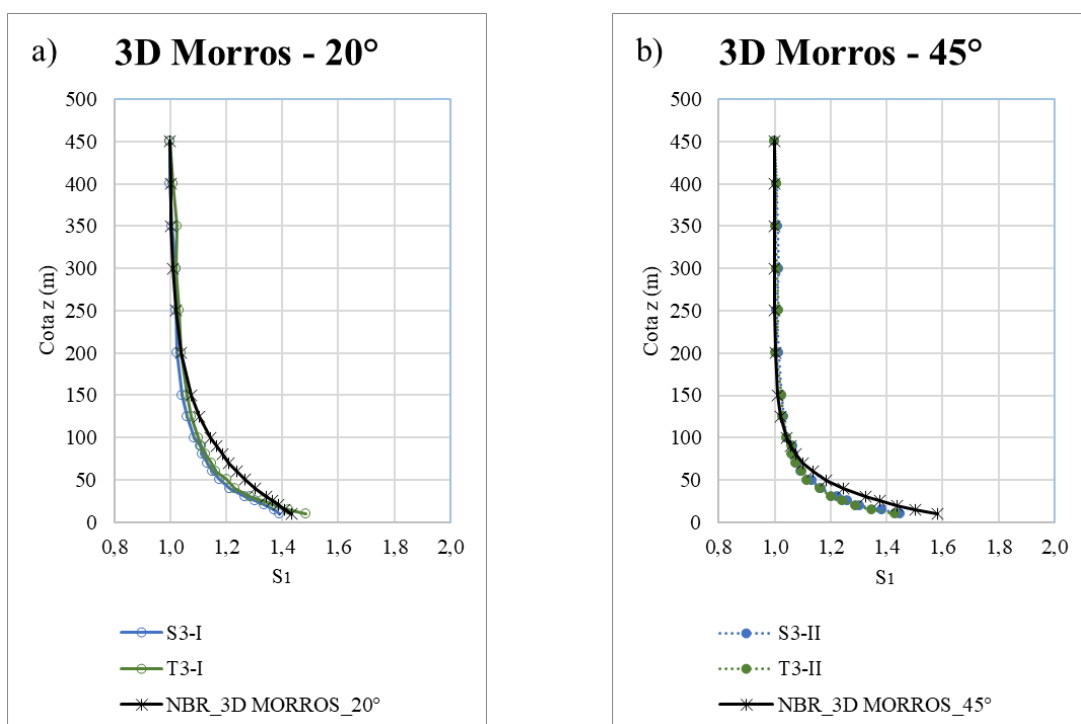


Figura 123 – Comparativo experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 3D Morros, para o ângulo de 20° (a) e de 45° (b).

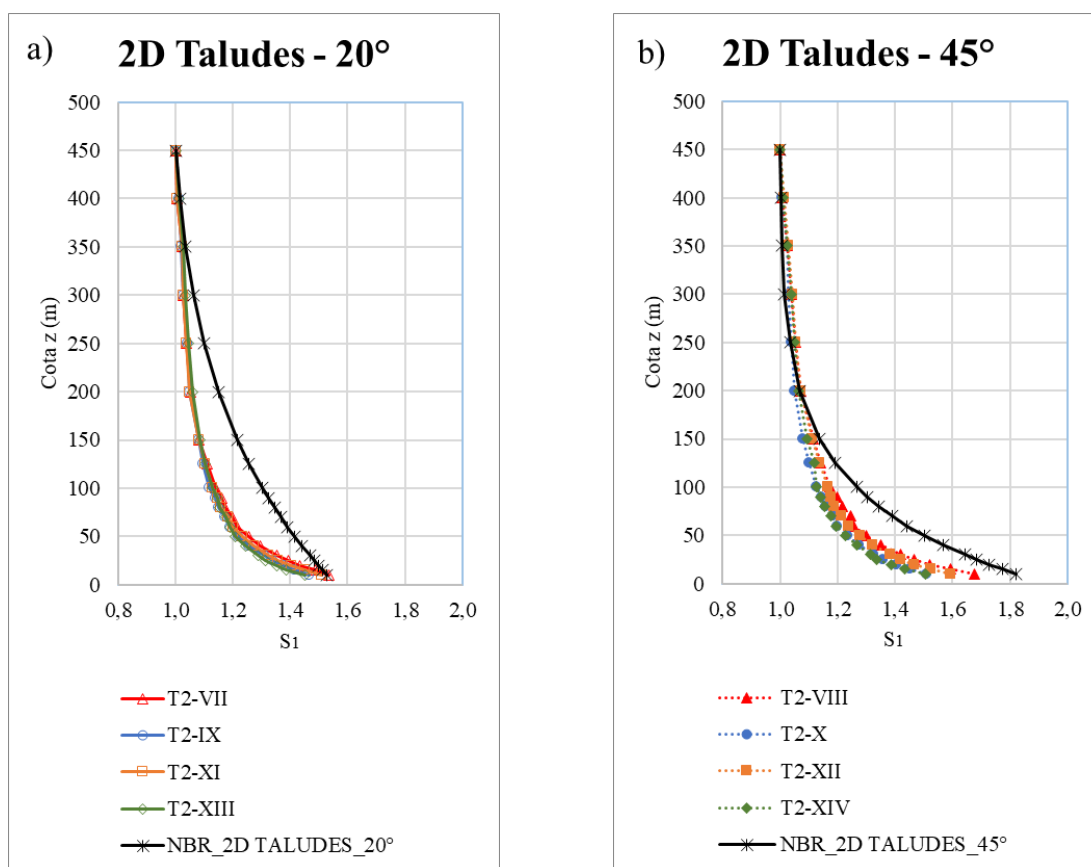


Figura 124 – Comparativo experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D Taludes, para o ângulo de 20° (a) e de 45° (b).

Tabela 4 – Diferença percentual entre fator topográfico experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D-Morros.

Cota z (m)	2D Morros			
	S2-I	S2-II	T2-I	T2-II
10	31%	24%	15%	28%
15	9%	15%	11%	28%
20	4%	15%	11%	27%
25	4%	14%	10%	25%
30	5%	13%	11%	24%
40	6%	12%	13%	22%
50	5%	10%	12%	15%
60	5%	7%	12%	12%
70	6%	5%	11%	8%
80	5%	3%	11%	6%
90	3%	2%	9%	5%
100	3%	1%	8%	3%
125	3%	-1%	6%	1%
150	1%	-2%	5%	0%
200	0%	-1%	3%	-1%
250	-1%	-1%	1%	-1%
300	-2%	-2%	0%	-1%
350	-2%	-1%	-1%	-2%
400	-4%	0%	-1%	-1%
450	0%	0%	0%	0%

Tabela 5 – Diferença percentual entre fator topográfico experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 3D-Morros.

Cota z (m)	3D Morros			
	S3-I	S3-II	T3-I	T3-II
10	3%	9%	-3%	11%
15	3%	9%	-1%	12%
20	4%	10%	1%	12%
25	5%	9%	3%	11%
30	6%	8%	4%	10%
40	8%	7%	6%	7%
50	8%	4%	6%	6%
60	8%	4%	7%	4%
70	7%	2%	5%	2%
80	6%	1%	5%	1%
90	5%	-1%	5%	0%
100	6%	0%	4%	0%
125	4%	-1%	3%	-1%
150	3%	-2%	1%	-2%
200	1%	-1%	0%	0%
250	0%	-1%	-1%	-1%
300	-1%	-1%	-1%	-1%
350	0%	-1%	-2%	0%
400	0%	-1%	-1%	-1%
450	0%	0%	0%	0%

Tabela 6 – Diferença percentual entre fator topográfico experimental e analítico para proposição de fator topográfico para NBR 6123, 2D-Taludes.

Cota z (m)	2D Taludes							
	T2-VII	T2-VIII	T2-IX	T2-X	T2-XI	T2-XII	T2-XIII	T2-XIV
10	0%	19%	4%	21%	1%	14%	5%	21%
15	2%	19%	7%	22%	4%	16%	9%	24%
20	4%	20%	9%	23%	7%	18%	11%	24%
25	7%	21%	11%	24%	9%	19%	13%	26%
30	8%	21%	12%	24%	11%	19%	14%	25%
40	11%	21%	15%	23%	13%	19%	16%	24%
50	13%	20%	16%	22%	15%	17%	17%	22%
60	14%	19%	17%	20%	16%	16%	17%	21%
70	14%	16%	17%	17%	15%	15%	16%	18%
80	15%	15%	17%	16%	16%	13%	16%	16%
90	14%	12%	16%	14%	16%	11%	16%	14%
100	14%	11%	17%	12%	16%	8%	15%	13%
125	13%	7%	15%	8%	14%	5%	14%	7%
150	12%	5%	13%	5%	13%	2%	12%	4%
200	9%	2%	10%	2%	10%	0%	9%	1%
250	6%	0%	6%	0%	6%	-2%	5%	-1%
300	3%	-1%	3%	-1%	3%	-3%	3%	-2%
350	1%	-2%	1%	-2%	1%	-2%	1%	-2%
400	1%	0%	0%	0%	1%	-1%	0%	-1%
450	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

De modo geral, os resultados apresentados neste estudo são coerentes com os resultados e considerações da literatura estudada. Os perfis de velocidades obtidos nas posições a barlavento e sotavento para os modelos estudados representaram de forma adequada os fenômenos que surgem quando o escoamento transpõe uma topografia. A barlavento há a diminuição das velocidades, podendo em alguns casos apresentar ligeiros aumentos. A sotavento do morro há a formação da esteira, com velocidades muito reduzidas. No cume do morro acontece o efeito *speed-up*, que são incrementos de velocidades, principalmente, em cotas próximas a superfície.

A primeira etapa consistiu na reanálise de alguns resultados da dissertação (SCOTTON, 2016). Os modelos são sinusodiais e triangulares, 2D e 3D e com ângulo de 20° e 45°. A barlavento dos morros os morros com ângulo de 45° influenciam mais no perfil de velocidades, para estes casos as velocidades do perfil são menores, enquanto que os modelos de 20° apresentaram perfis próximos ao perfil referência. Os modelos 2D também apresentam menores velocidades em relação aos modelos 3D. Outra variável estudada é a seção transversal, onde modelos sinusodiais apresentaram maiores velocidades em relação aos triangulares. Na segunda etapa, onde é prolongado em uma ou três vezes a altura no cume dos morros, observa-se que a extensão do cume interfere nos perfis. Para o modelo com extensão 1H o perfil apresenta velocidades reduzidas, enquanto que para a extensão 3H, em alguns casos, houve o aumento das velocidades. Para a terceira etapa, que considera o efeito de patamares intermediários a barlavento de taludes, na borda destes patamares intermediários há um aumento das velocidades que diminui até chegar ao sopé da próxima encosta. Para os modelos onde há dois patamares intermediários, observa-se que no segundo patamar intermediários o incremento de velocidades é maior que o incremento do primeiro patamar.

No cume dos morros e taludes, em todos os casos estudados se observou o efeito *speed-up*, que consiste no incremento de velocidades em cotas próximas a superfície. Para os modelos estudados na primeira etapa, se observa que para as três primeiras cotas o maior incremento é para o modelo de 45° e em seguida o modelo de 20° apresenta as maiores velocidades. Os modelos sinusodiais 2D apresentam maiores *speed-up* que os sinusodiais 3D. Para os modelos

triangulares acontece o inverso. No geral os modelos 3D tendem a interferir menos no perfil de velocidades que os modelos 2D no cume dos morros. Na segunda etapa, a extensão do cume influencia nos perfis de velocidade, observa-se que aumentando a extensão o *speed-up* também aumenta. Porém, isto é evidente em modelos 2D, nos modelos 3D não houve aumento significativo do *speed-up* pela extensão do cume do morro.

Os perfis de velocidades no cume dos taludes da terceira etapa são diretamente influenciados pela presença dos patamares intermediários. De modo geral, a presença dos patamares diminui os incrementos de velocidades no cume do morro. Entretanto, não se pode afirmar isso em relação ao modelo sem a presença de patamares intermediário, pois não foi estudado. O modelo que mais se aproxima é o modelo 2D com extensão do cume de 3H. Outras constatações em relação as características foram observadas como o comprimento do patamar. Quanto maior o comprimento deste patamar menor é o incremento de velocidades no cume, e aumentam as velocidades na borda dos patamares intermediários a barlavento. O ângulo da encosta a barlavento também influencia no perfil de velocidades do cume, o maior ângulo gerou maiores incrementos. Em relação a quantidade de patamares, os modelos produzidos com dois patamares intermediários apresentaram menor incrementos de velocidade no cume do talude.

Após as análises dos resultados experimentais foram realizados estudos comparativos desses com os resultados obtidos através das formulações das normas. Primeiramente, para verificar a coerência entre as normas realizou-se o estudo do terreno plano, que apresentou perfis muito coerentes e com um erro de até 6%. Como as normas não apresentam diferença nos cálculos entre as formas dos morros sinusoidal e triangular os resultados foram exatamente iguais. As normas NBR 6123 e AS/NZS são bem simplificadas e não apresentam cálculo diferenciado para morros e taludes e nem para modelos 2D ou 3D. As formulações das normas ASCE e NBCC com diferenciação entre modelos 2D e 3D, incluindo se o tipo topografia é morro ou talude. Dentre as normas estudadas as que apresentam as formulações mais complexas são o EUROCODE e a AIJ, embora tenham esta característica os modelos não diferenciam a dimensionalidade da topografia para os morros que pode ser 2D ou 3D. A diferenciação apresentada é entre morros e taludes para o EUROCODE E AIJ.

No geral, tanto a barlavento como a sotavento dos morros as normas não apresentam formulações adequadas ao perfil nesta posição. Exceto a AIJ a sotavento onde a formulação apresenta uma curva que representa o fenômeno da esteira, porém superestimando as velocidades. No geral, as normas apresentam uma redução linearizada de x/L em relação ao

perfil do cume do morro, e que mesmo assim as velocidades são maiores que o perfil sem morro. Contrariando os resultados experimentais que mostram, que a barlavento na cota $H/2$, as velocidades são menores que o perfil referência (sem morro ou talude).

Para o cume do morro comparando os dados experimentais com as normas se observa que todas as normas estudadas superestimam o perfil de velocidades, grande parte das normas não representa se quer a curva experimental. As normas que apresentam os perfis de velocidades mais semelhantes ao experimental são ASCE e ASNZS, porém superestimados.

A proposição para a nova formulação do fator topográfico apresenta valores muito parecidos com os experimentais. Entretanto não representa o “embarrigamento” do perfil, fazendo com que as cotas mais próximas a superfície apresentem maiores diferenças em relação ao experimental. Esta nova formulação foi desenvolvida de forma empírica com a análise da influência das variáveis e análise das formulações descritas nesta tese. Dessa forma, a formulação e os coeficientes apresentam ficam restritos aos dados experimentais deste estudo. De uma forma geral, a formulação proposta apresenta curvas bem próximas às curvas dos experimentos, mostrando que a proposição é precisa. Dentre os modelos estudados o que apresentou as menores diferenças (< que 12%) foi o modelo 3D Morros. O modelo 2D Morros apresentou variações maiores, em torno de 30% para cotas até 40 m. O modelo 3D Taludes embora tenha apresentado variações em torno de 25%, pode-se observar que se mantinham até a cota de 100 m.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as sugestões para trabalhos futuros, reproduzir modelos experimentais para ângulos menores que 20° e entre os ângulos de 20° e 45° , considerando as variáveis com maior influência expostas neste trabalho. Verificar a influência de morros 3D com a extensão dos patamares na extensão transversal ao vento, de modo que seja intermediário ao modelo 3D e 2D. Analisar modelos com alturas menores visando diminuir o efeito de bloqueio no túnel. Coletar e analisar outros modelos para embasar a proposição de formulação para o fator topográfico da NBR 6123.

Em relação à caracterização do vento poderiam ser analisadas a intensidade de turbulência, diferenças de escalas de turbulência e flutuações das velocidades para observar os efeitos de rajadas.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ANDERSON, J. D. Ludwig Prandtl's Boundary Layer. **Physics Today. American Institute of Physics**. v. 58, n. 12, p. 42-48, 2005.
- 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.
- ARYA, S.P.S.; GADIYARAM, P.S. An experimental study of flow and dispersion in the wakes of three-dimensional low hills. **Atmospheric Environment**.v. 20, n. 4, p. 729-740, 1986.
- AS/NZS. **Australian /New Zealand 1170.2: Structural Design Actions - Part 2: Wind Actions**. Sidney: SAI Global Limited 2002.
- 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 2005.
- ASCE. **ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures**. Virginia: ASCE 2010.
- ASCE. **ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures**. Virginia: ASCE 2016.
- 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.

BRITISH STANDARD, **BS 6399 Loading for buildings, Part 2, Code of practice for wind loads**. British Standards Institution, London.1995.

BRITISH STANDARD, **BS 6399 Loading for buildings, Part 2, Code of practice for wind loads**. British Standards Institution, London. 2005.

BRITISH STANDARD, **BS 6399 Loading for buildings, Part 2, Code of practice for wind loads**. British Standards Institution, London. 2010.

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.

CAO, S.; TAMURA, T. Effects of roughness blocks on atmospheric boundary layer flow over a two-dimensional low holl with/without sudden roughness change. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 95, p. 679-695, 2007.

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 2002.

CEN. **EUROCODE 1: Actions on structures - Part 1-4: General Actions - Wind Actions**. Brussels 2005.

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.

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.

DANTEC DYNAMICS. Measurement Principles of CTA. Disponível em: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/constant-temperature-anemometry-cta/measurement-principles-of-cta/>. Acesso em: 13 jul 2020.

DEAVES D. M., Harris R.I. A mathematical model of the structure of strong winds. **C.R.I.A. Report 76. Construction Industry Research and Information Association**. London, 1981.

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.

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.

FINARDI, S.; MORSELLI, M. G.; JEANNET, P. E. Wind flow models over complex terrain for dispersion calculations. **Cost Action 710**. 1997.

GLANVILLE, M. J.; KWOK, K. C. S. Further investigation of the blockage-tolerant wind tunnel technique. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 69-71, p. 987-995, 1997.

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.

IBGE. Secretaria de Planejamento, orçamento e coordenação. **Dicionário Geológico Geomorfológico**. Rio de Janeiro, 8 ed. 1993.

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.

LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES - LAC UFRGS. Túnel de Vento TV-2 UFRGS Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/lac/tunel.htm>. Acesso em: 13 jul 2020.

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.

MATTUELLA, J. M. L. Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain microsite. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 110-119, 2016.

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. 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.

MINISTRY OF AVIATION LONDON. Aeronautical research council reports and memoranda. **A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel**. Reports and Memoranda n. 3400, 1963.

NODA, M.; UTSUNOMIYA, H; NAGAO, F. Basic study on blockage effects in turbulent boundary layer flows. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 54/55, p. 645-656, 1995.

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.

_____. Experimental study of topographic effects on gust wind speed. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 97, p. 426-438, 2009.

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 1995.

NRCC. **National Building Code of Canada** Ottawa: NRC Publications 2005.

NRCC. **National Building Code of Canada** Ottawa: NRC Publications 2010.

NRCC. **National Building Code of Canada** Ottawa: NRC Publications 2015.

PEARSE, J. R.; LINDLEY, D.; STEVENSON, D. C. Wind flow over ridges in simulated atmospheric boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 21, n. 1, p. 77-92, 1981.

PIROOZ, A. A. S.; FLAY, R. G. J. Comparison of speed-up over hills derived from wind-tunnel experiments, wind-loading standards and numerical modelling. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 168, n. 2, p. 213-246, 2018.

QUENEY, P. The problem of air flow over mountains: A summary of theoretical studies. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 29, p. 16-26, 1948.

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.

SAHINI, D. **Wind tunnel blockage corrections: A computational study**. 2004. 121 f. (Mestrado em Engenharia). Engenharia Mecânica, Texas Tech University, Texas.

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.

SCOTTON, J. A. **Análise da velocidade incremental em morros: comparação entre procedimentos normativos e estudo experimental em túnel de vento**. 2016. 181 f. (Mestrado em Engenharia). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SCORER, R. S. Theory of waves in the lee of mountains. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 75, p. 41-56, 1949.

_____. 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.

TAN, C.; FANG, W. Mapping the wind hazard of global tropical cyclones with parametric wind field models by considering the effects of local factors. **Institute J Disaster Risk Sci**, v. 9, p. 86-99, 2018.

TAYLOR, P. A. Numerical studies of neutrally stratified planetary-boundary layer flow above gentle topography I: Two-dimensional cases. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 12, p. 37-60, 1977.

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.

TIAN, W.; OZBAY, A.; HUI, H. An experimental investigation on the aeromechanics and wake interferences of wind turbines sited over complex terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 172, n. 12, p. 379-394, 2018.

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.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **The airflow over mountains.** Technical note n.34. 1960.

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.; AYOTTE, K. W.; TAYLOR, P. A. Developmet 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.

APÊNDICE A – Estudo comparativo

A. GRÁFICOS COMPARATIVOS SEGUNDA ETAPA

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência do ângulo do morro, para a posição de medição B0.

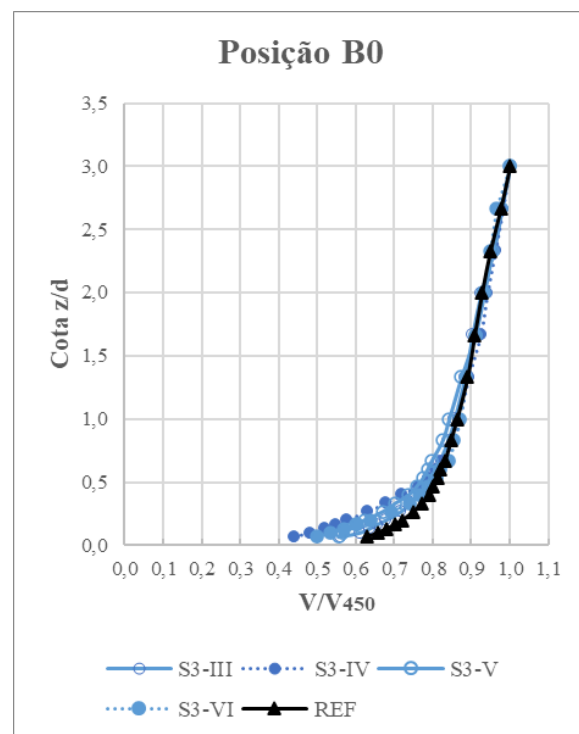
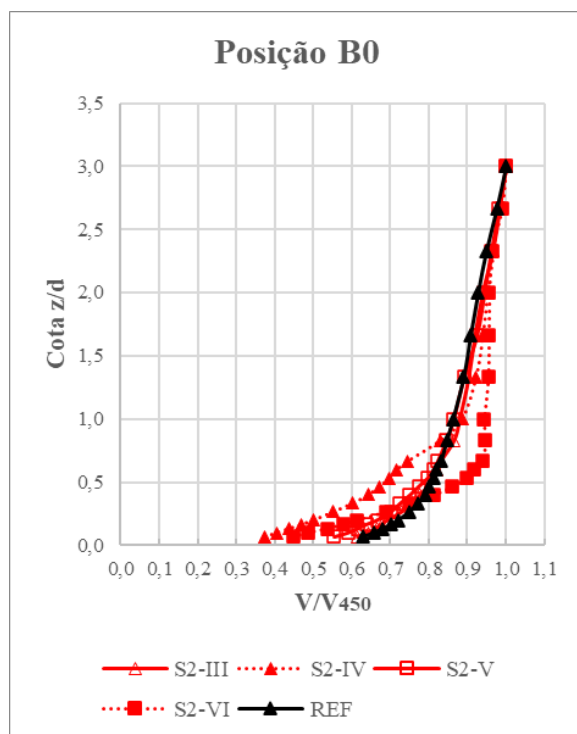


Figura A.1 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 2D, posição de medição B0.

Figura A.2 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 3D, posição de medição B0.

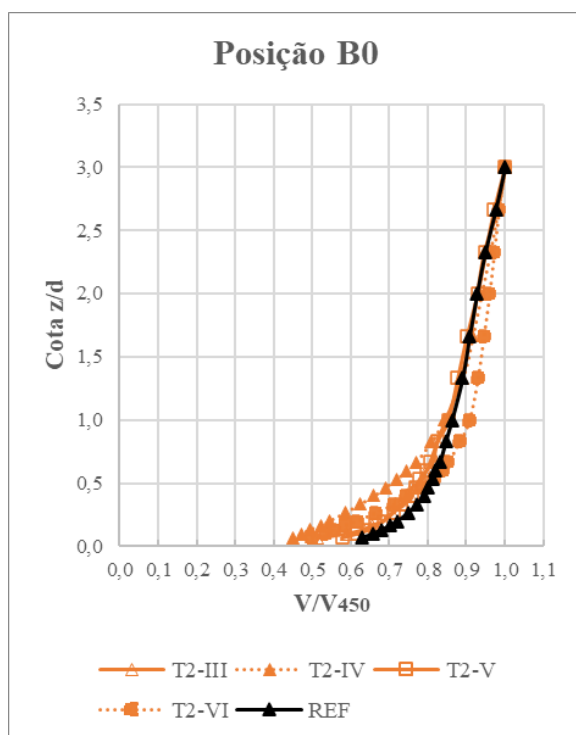


Figura A.3 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 2D, posição de medição B0

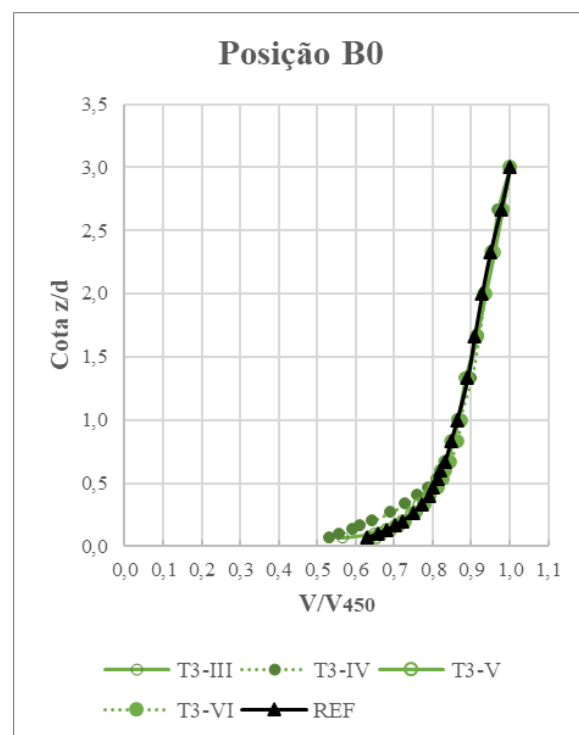


Figura A.4 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 3D, posição de medição B0.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da dimensionalidade 2D e 3D para a segunda etapa da pesquisa, para a posição de medição B0.

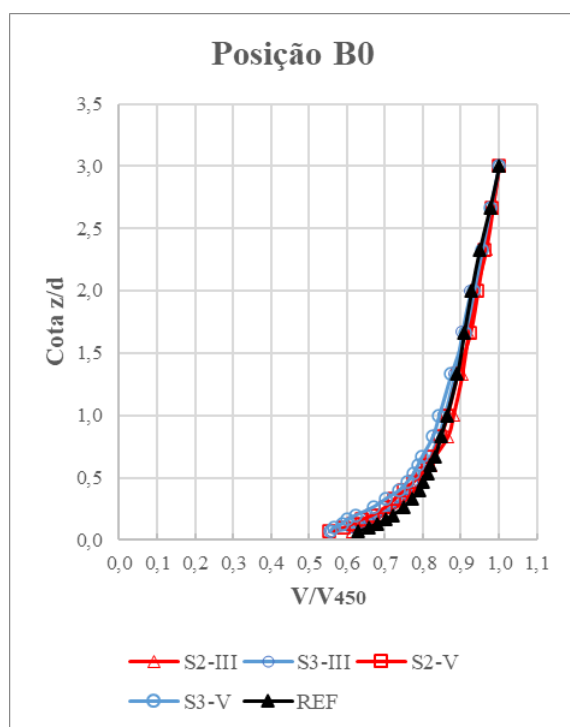


Figura A.5 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição B0.

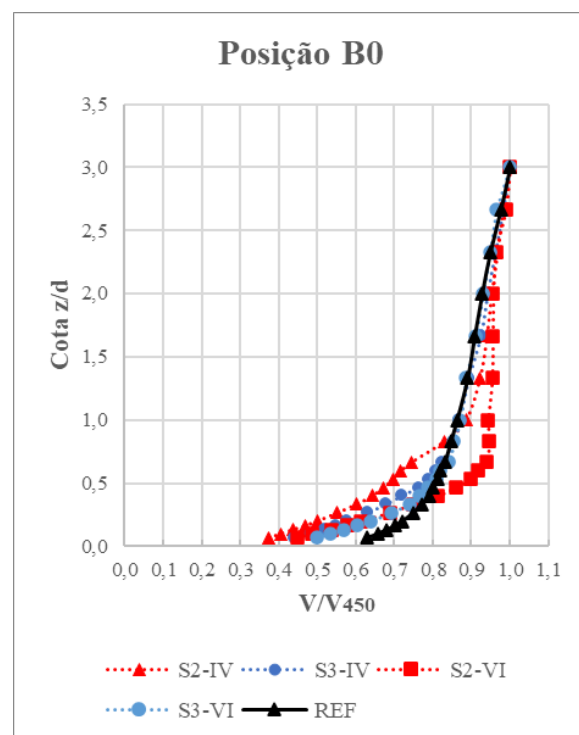


Figura A.6 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição B0.

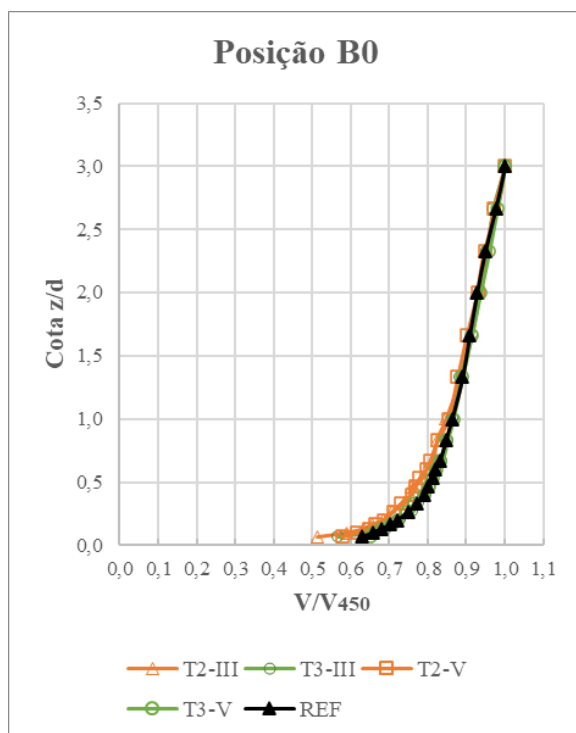


Figura A.7 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição B0.

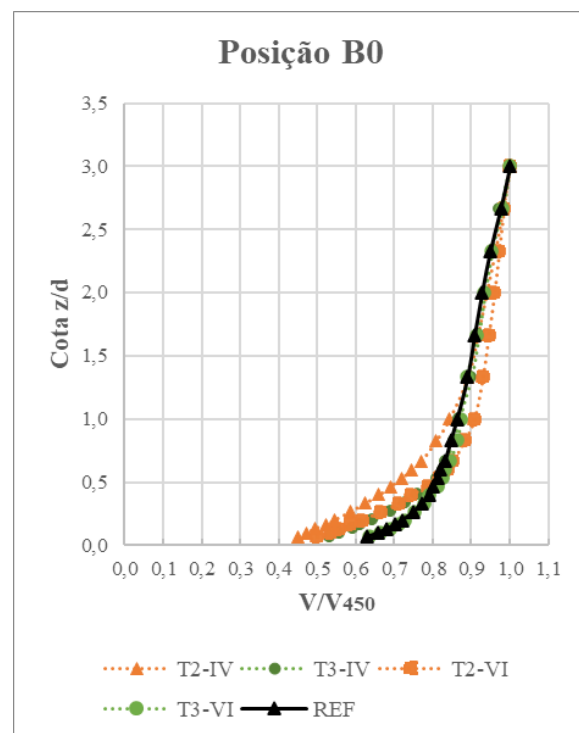


Figura A.8 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição B0.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da seção transversal, para a posição de medição B0.

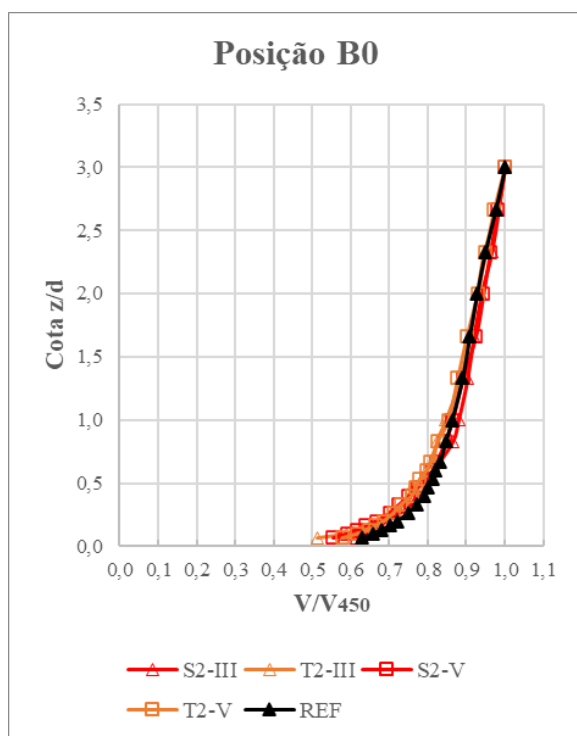


Figura A.9 – Comparação entre os modelos 2D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição B0.

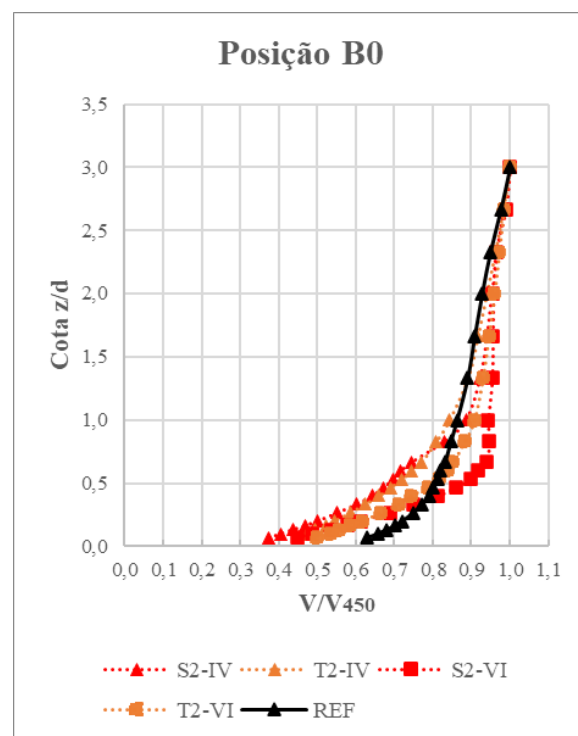


Figura A.10 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição B0.

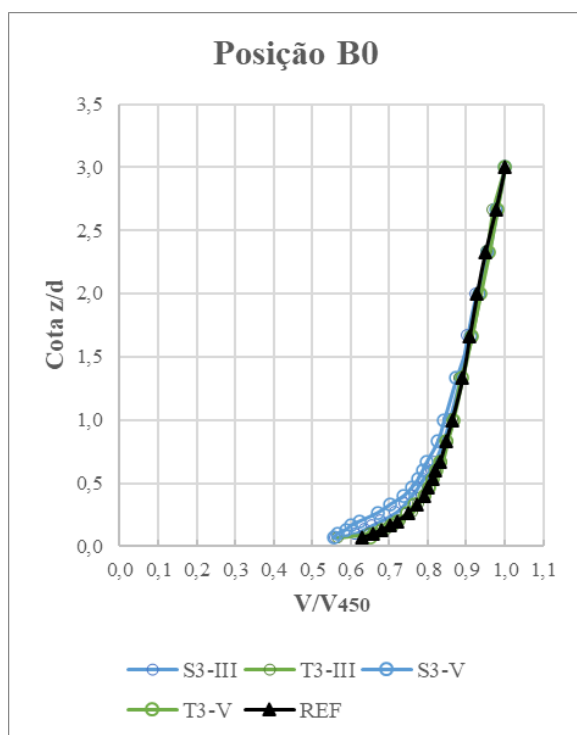


Figura A.11 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição B0.

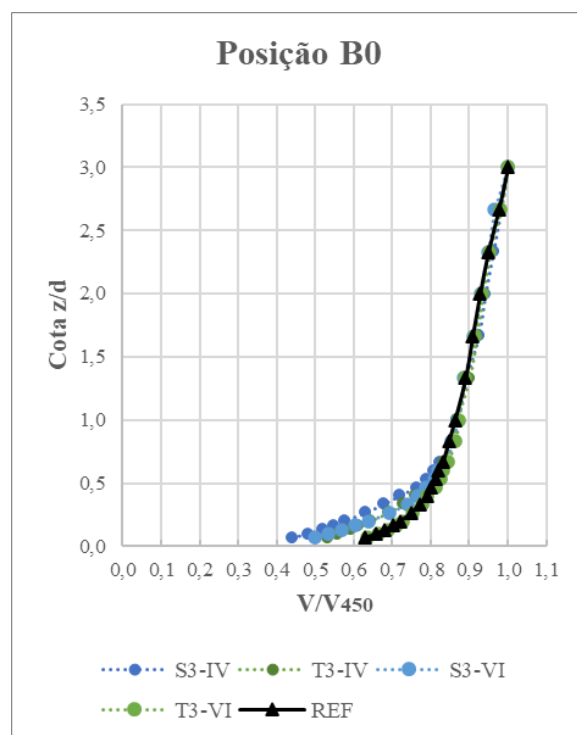


Figura A.12 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 45°, posição de medição B0.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência do ângulo do morro, para a posição de medição P0.

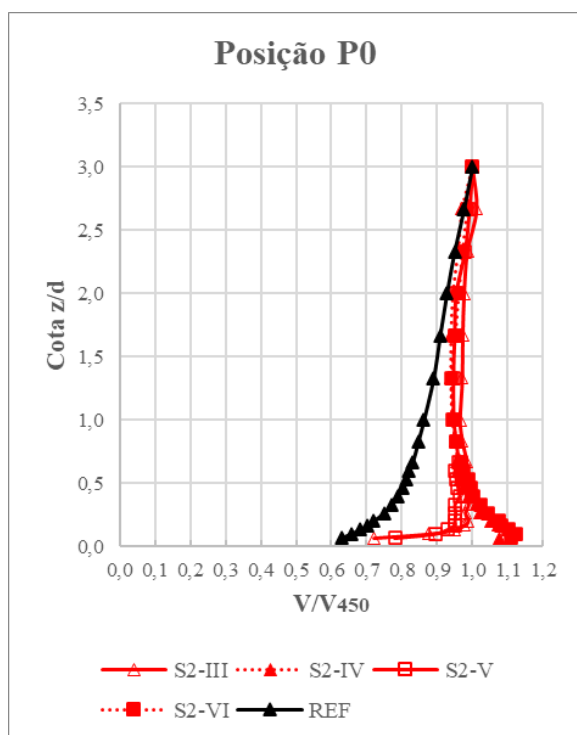


Figura A.13 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 2D, posição de medição P0.

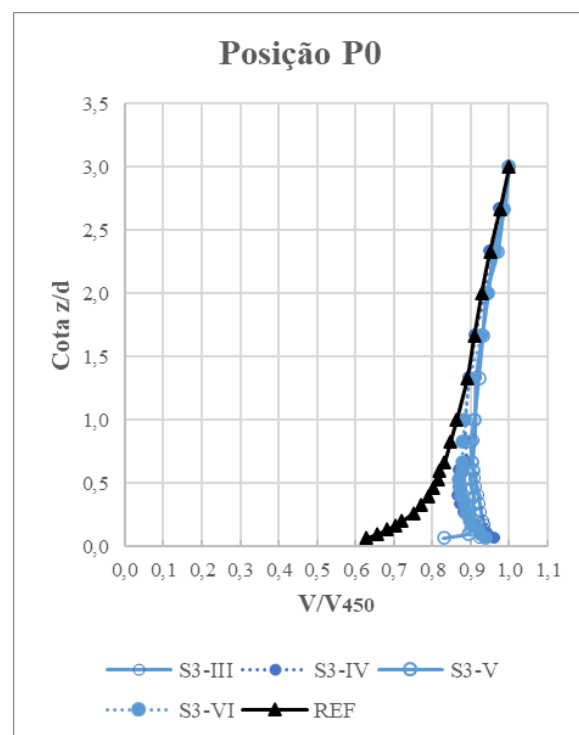


Figura A.14 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 3D, posição de medição P0.

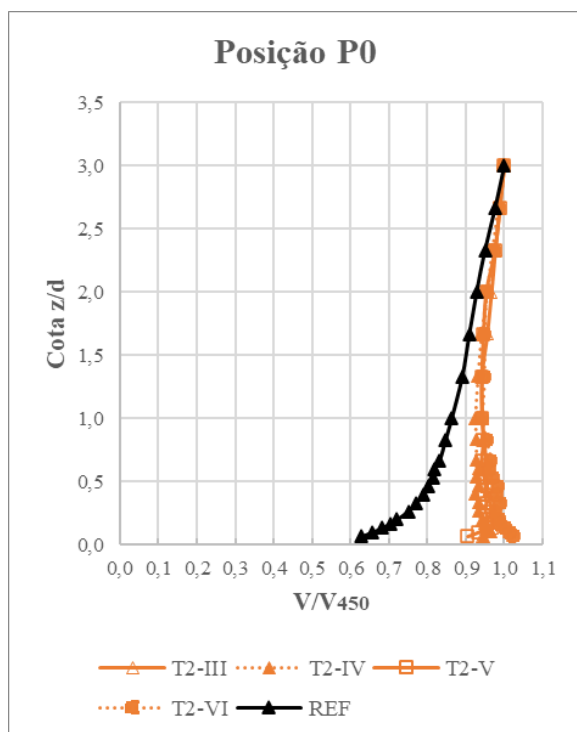


Figura A.15 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 2D, posição de medição P0.

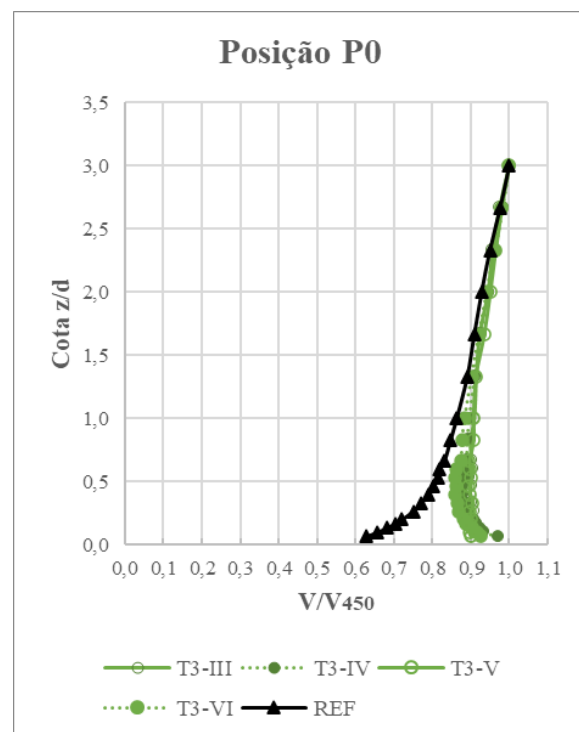


Figura A.16 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 3D, posição de medição P0.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da dimensionalidade 2D e 3D para a segunda etapa da pesquisa, para a posição de medição P0.

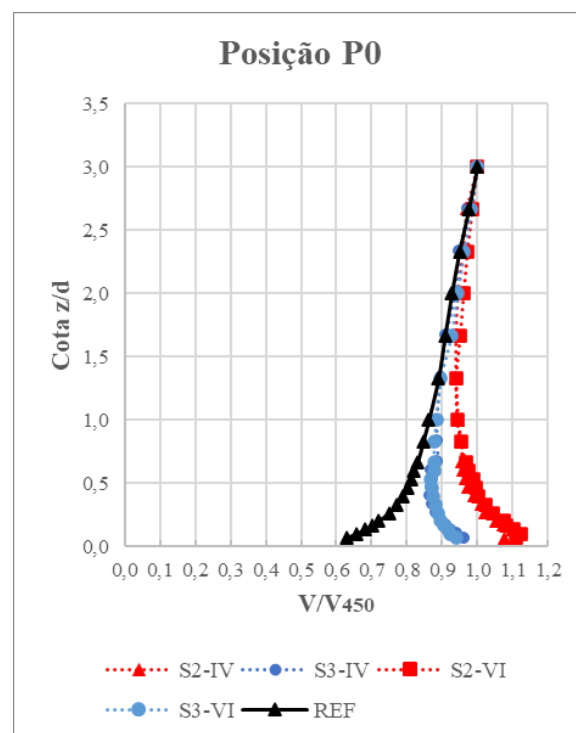
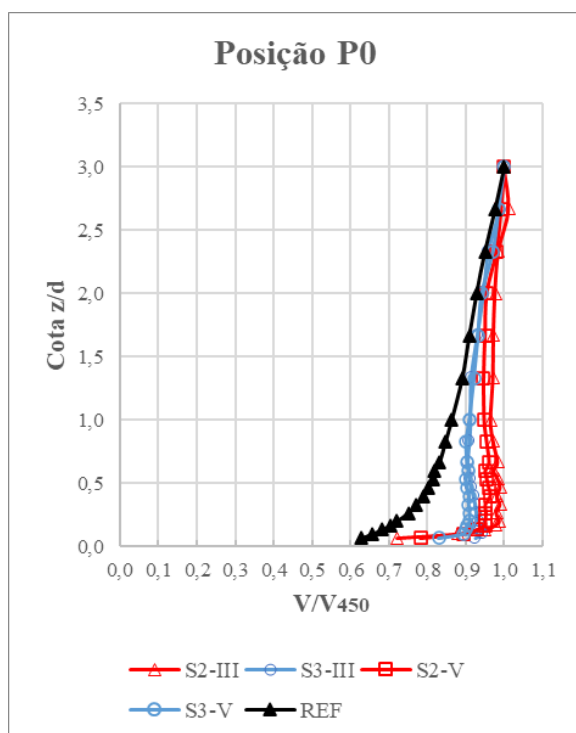


Figura A.17 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição P0. Figura A.18 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição P0.

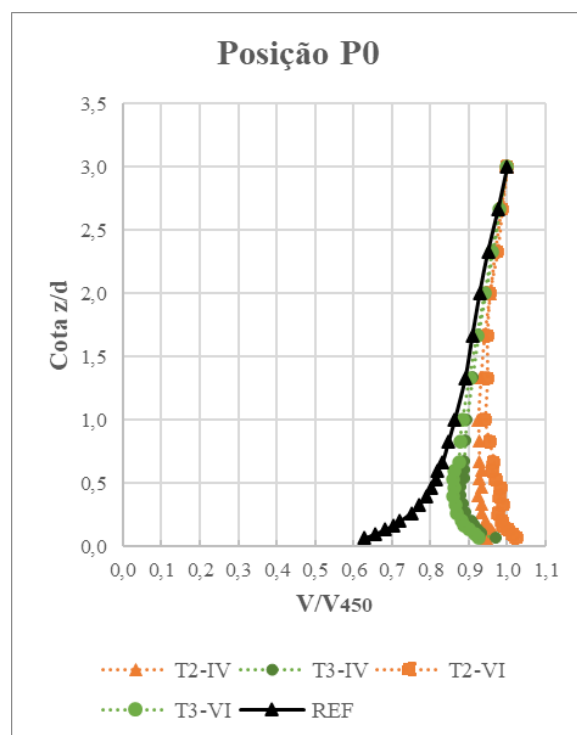
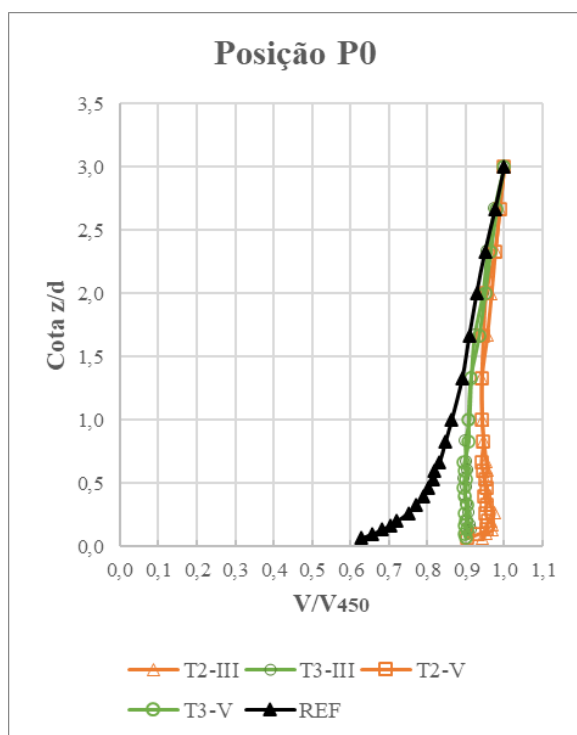


Figura A.19 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição P0. Figura A.20 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição P0.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da seção transversal, para a posição de medição P0.

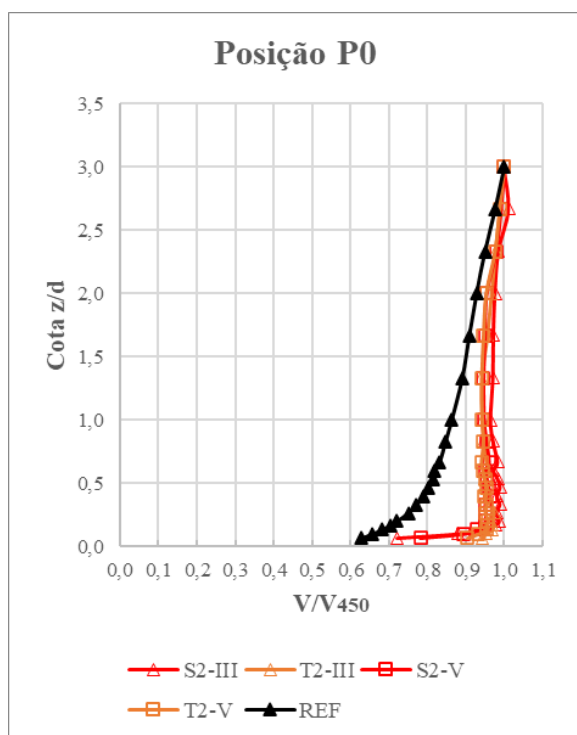


Figura A.21 – Comparação entre os modelos 2D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição P0.

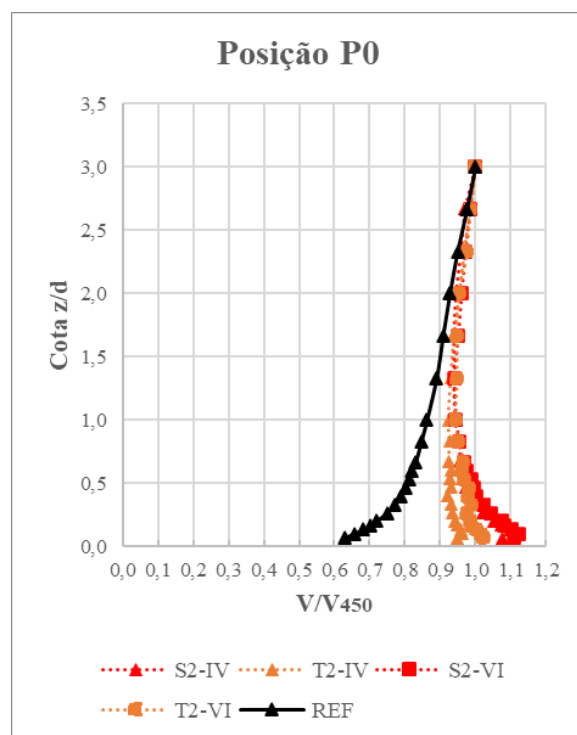


Figura A.22 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição P0.

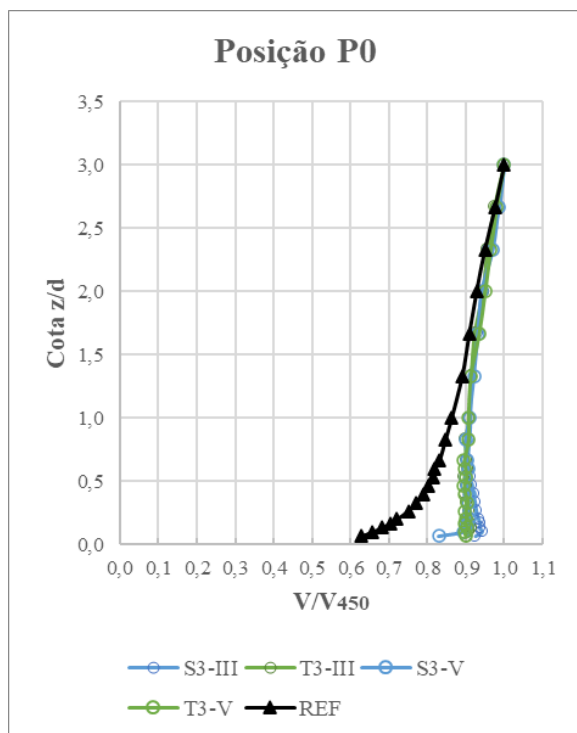


Figura A.23 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição P0.

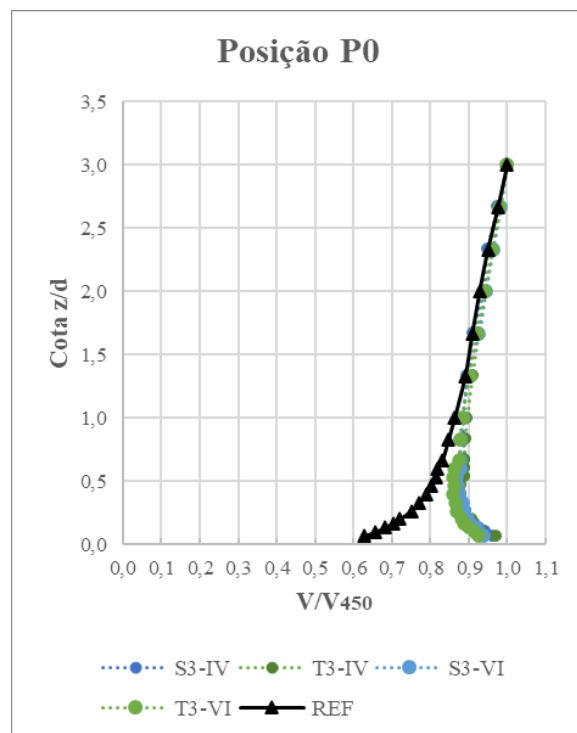


Figura A.24 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 45°, posição de medição P0.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência do ângulo do morro, para a posição de medição P150.

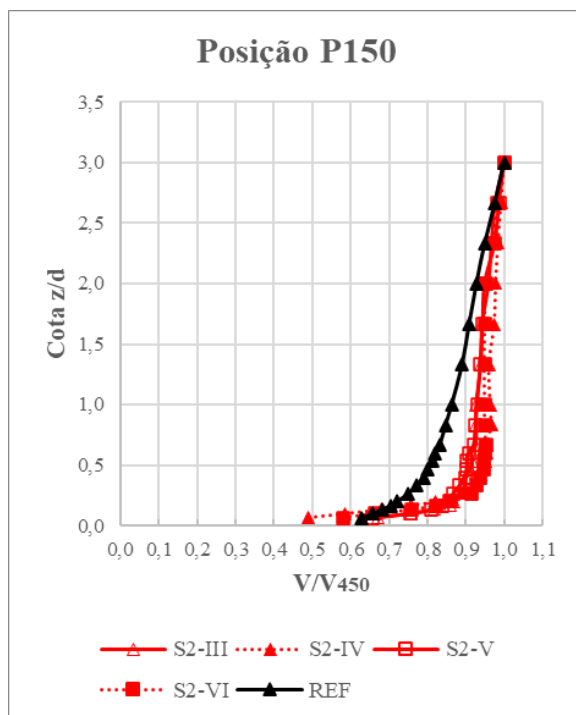


Figura A.25 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 2D, posição de medição P150.

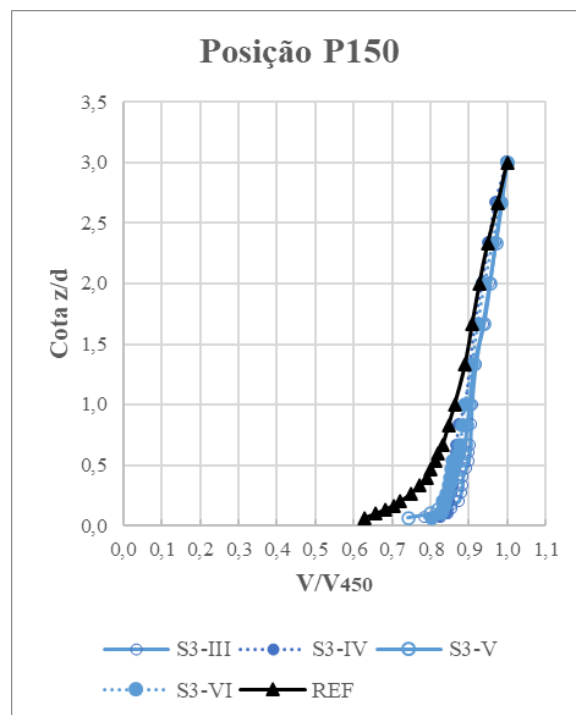


Figura A.26 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 3D, posição de medição P150.

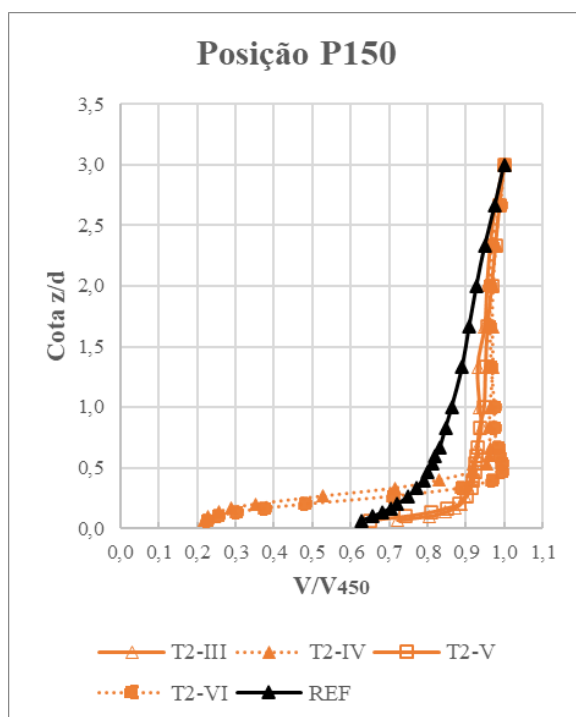


Figura A.27 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 2D, posição de medição P150.

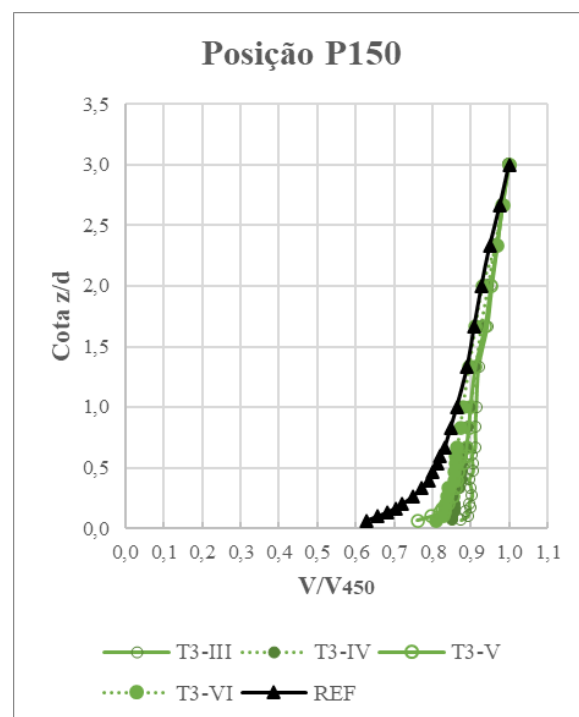


Figura A.28 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 3D, posição de medição P50.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da dimensionalidade 2D e 3D para a segunda etapa da pesquisa, para a posição de medição P150.

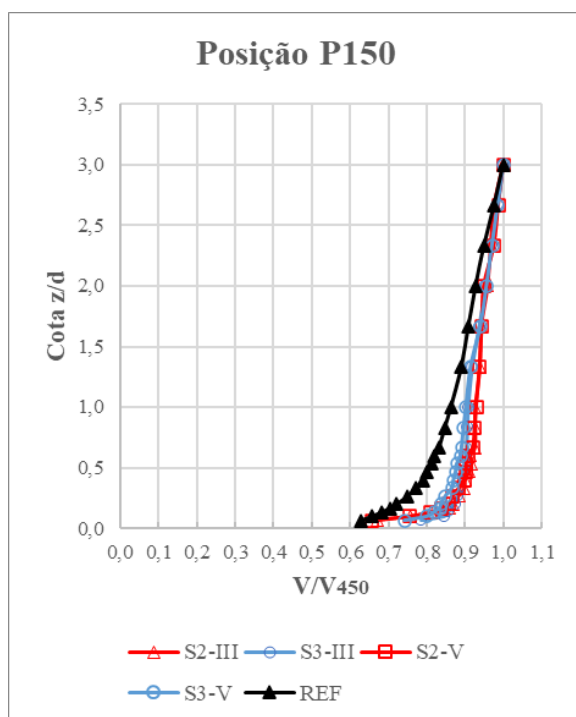


Figura A.29 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição P150.

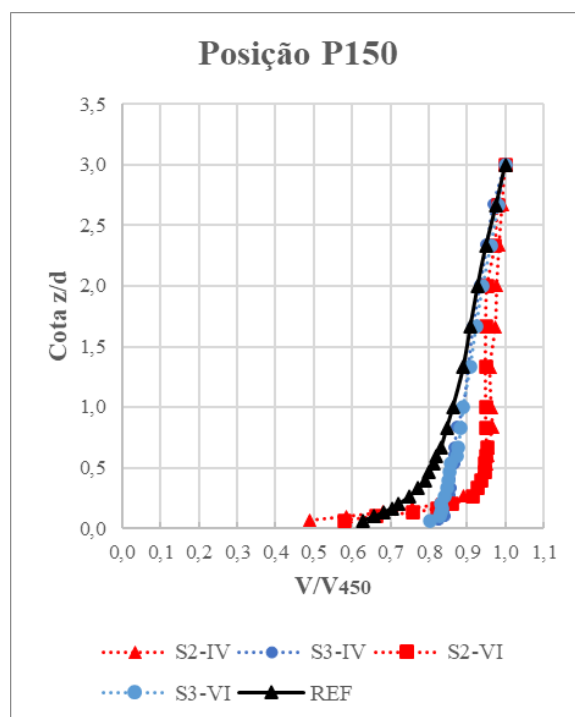


Figura A.30 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição P150.

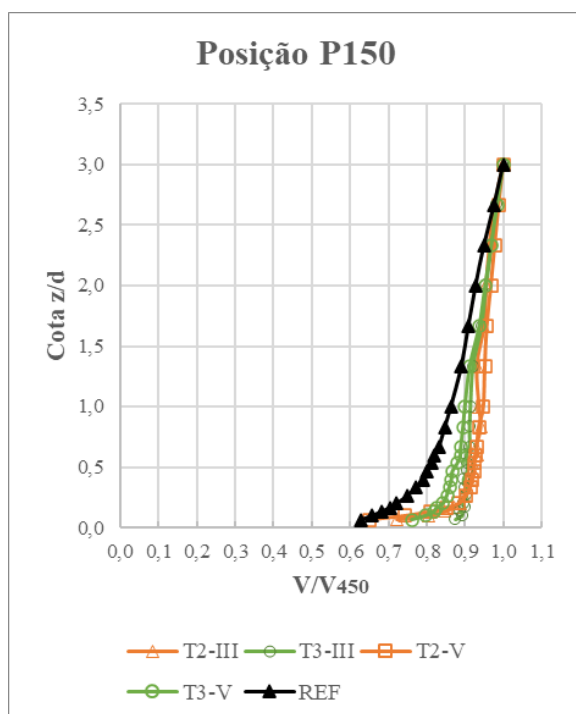


Figura A.31 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição P150.

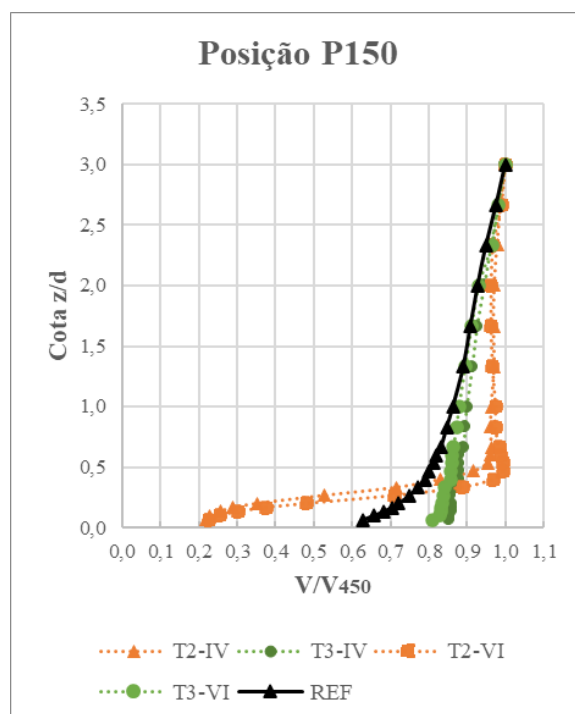


Figura A.32 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição P150.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da seção transversal, para a posição de medição P150.

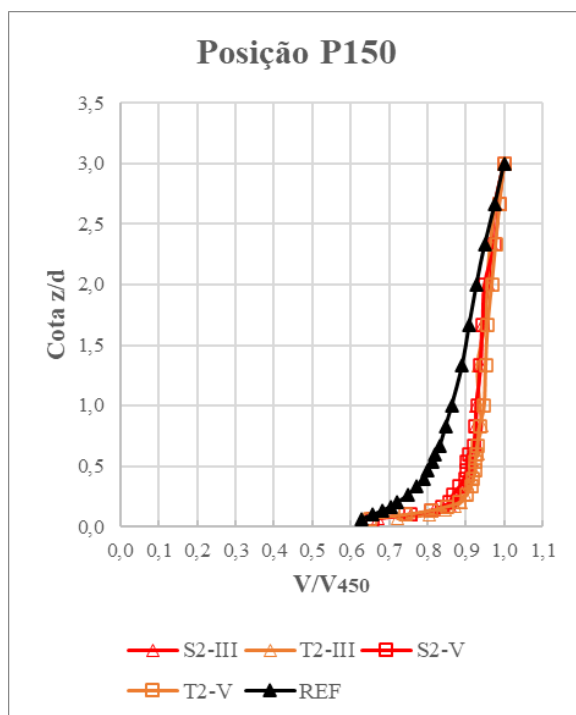


Figura A.33 – Comparação entre os modelos 2D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição P150.

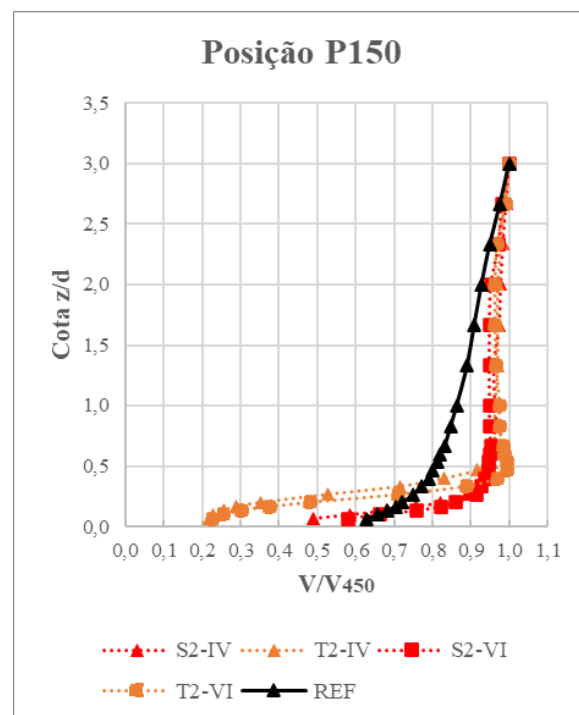


Figura A.34 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição P150.

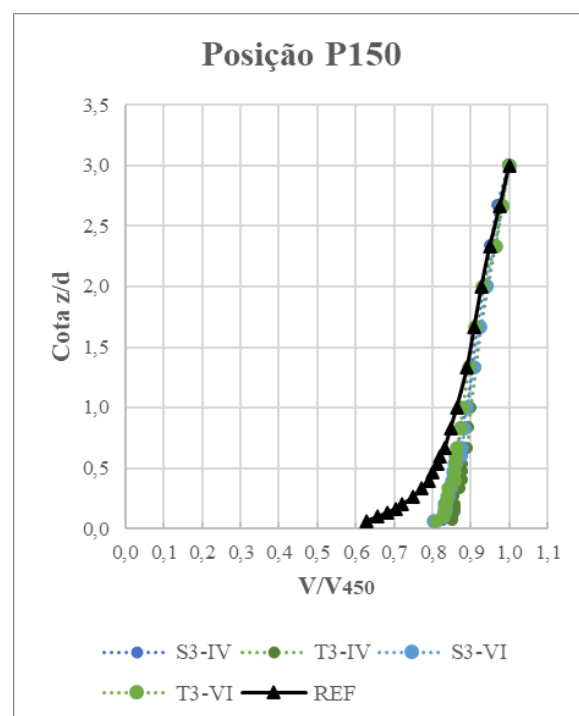
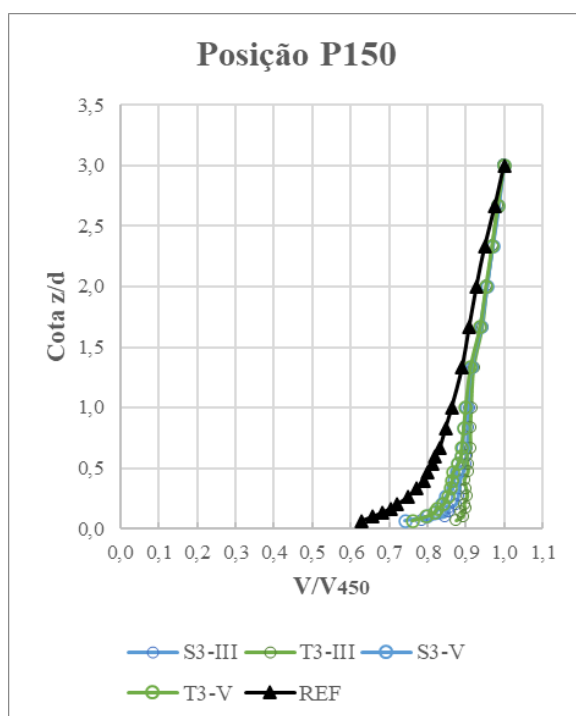


Figura A.35 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição P150.

Figura A.36 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 45°, posição de medição P150.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da extensão do cumeeiro do morro, para as posições de medição P300.

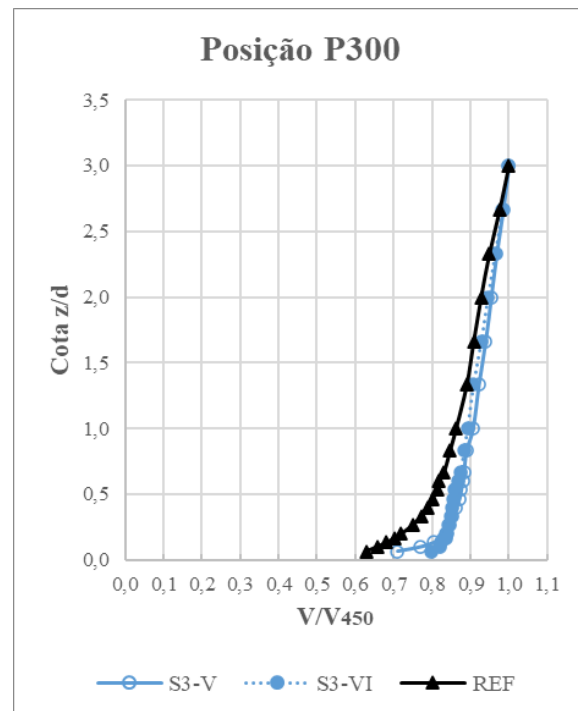
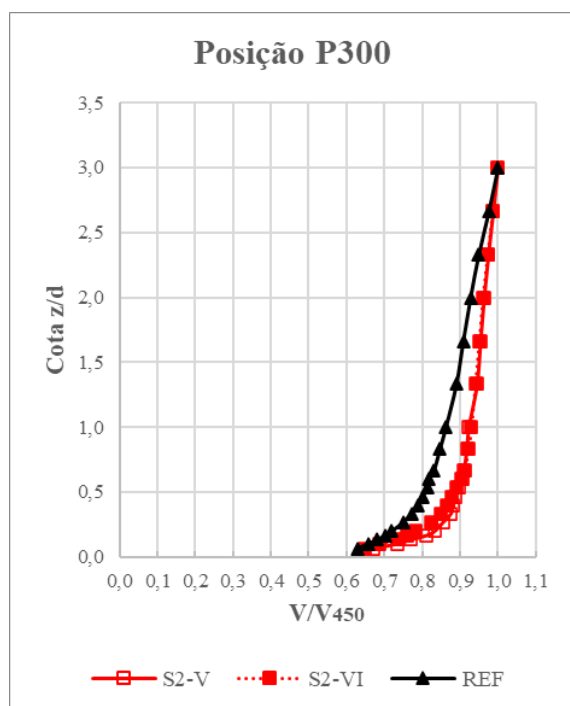


Figura A.37 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 2D, posições de medição P300.

Figura A.38 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 3D, posições de medição P300.

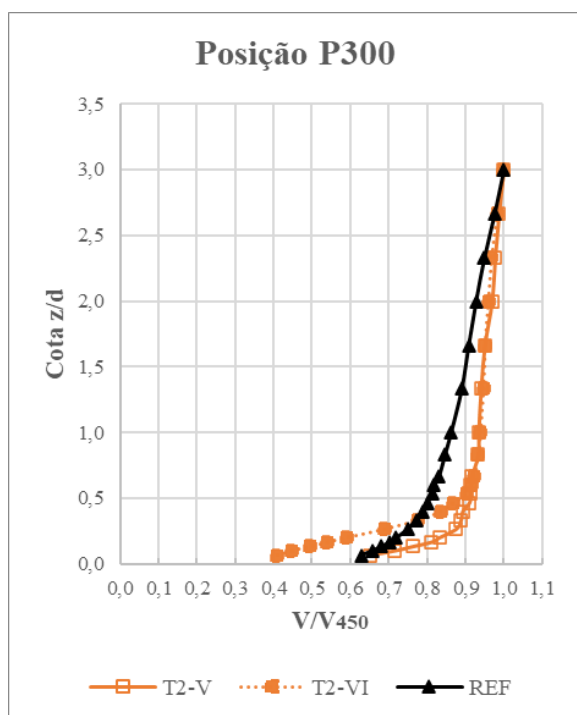


Figura A.39 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 2D, posições de medição P300.

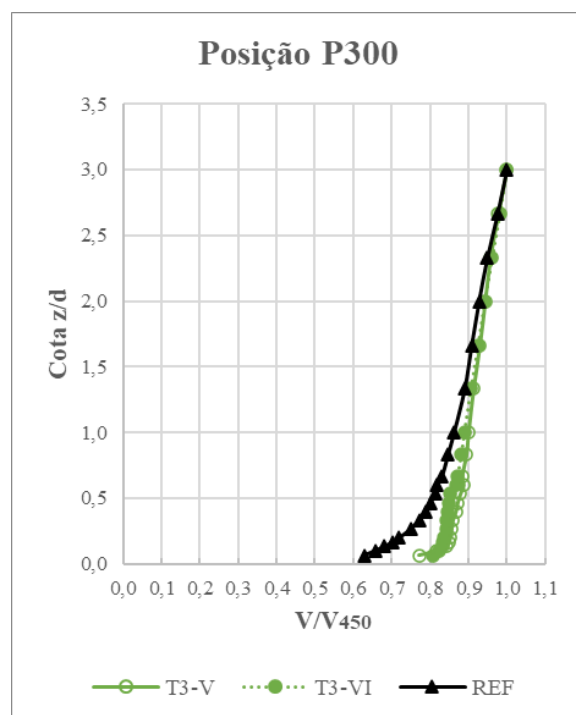


Figura A.40 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 3D, posições de medição P300.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da dimensionalidade 2D e 3D para a segunda etapa da pesquisa, para as posições de medição P300.

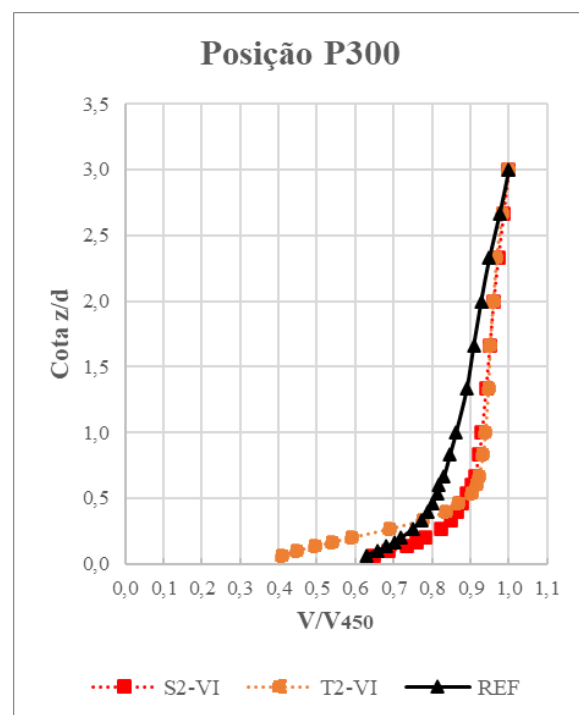
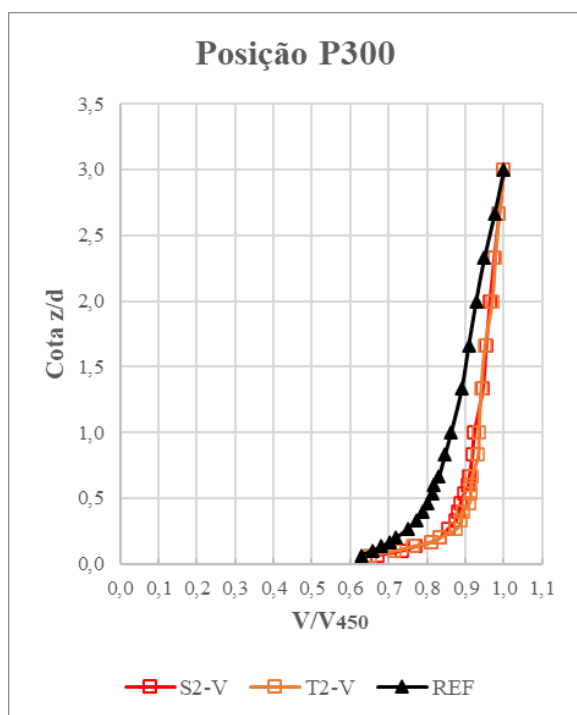


Figura A.41 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 20°, posições de medição P300.

Figura A.42 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 45°, posições de medição P300.

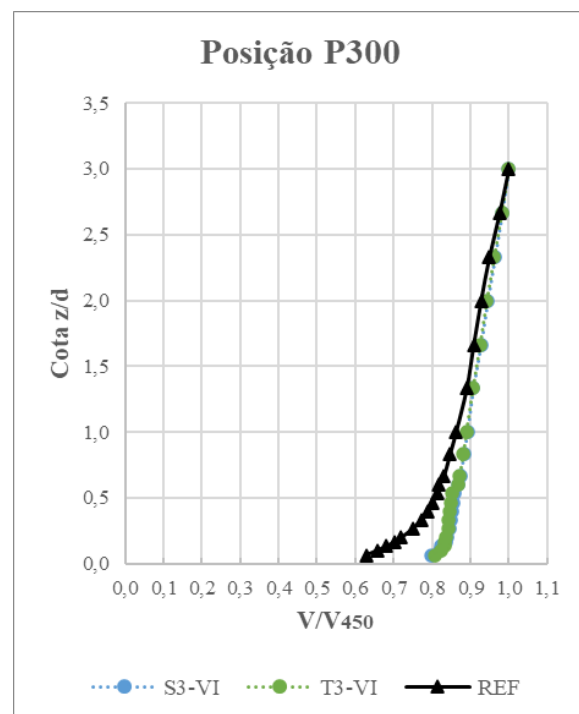
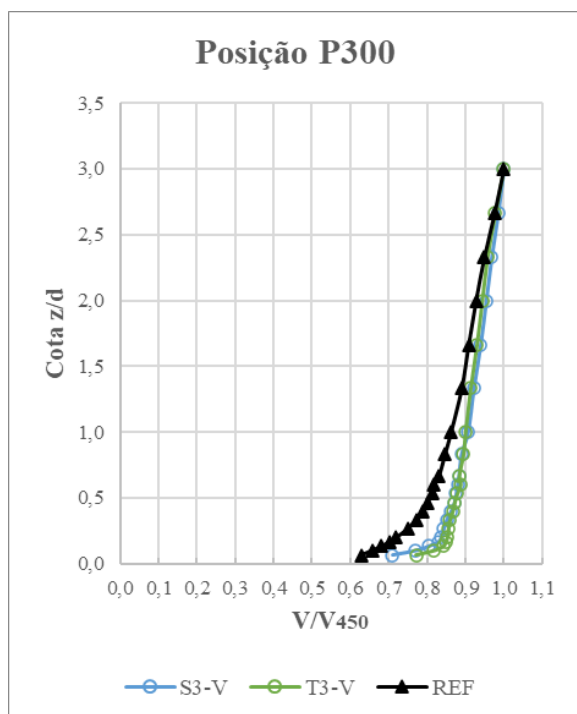


Figura A.43 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 20°, posições de medição P300.

Figura A.44 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 45°, posições de medição P300.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da seção transversal, para as posições de medição P300.

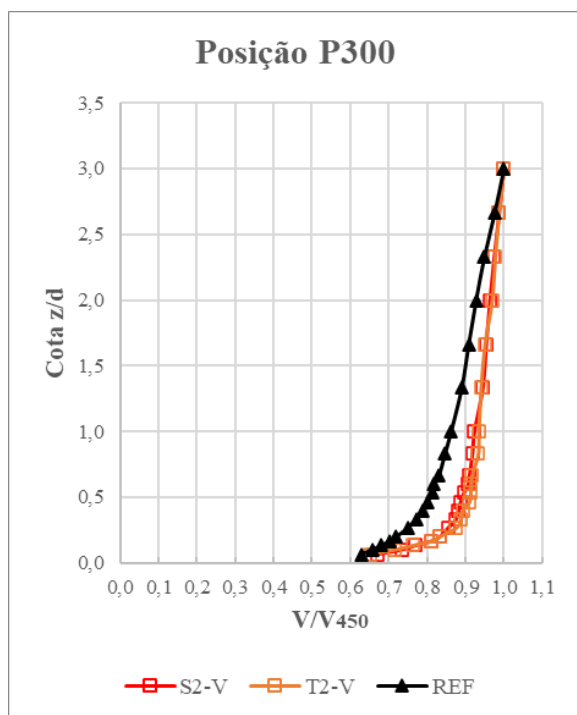


Figura A.45 – Comparação entre os modelos 2D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posições de medição P300.

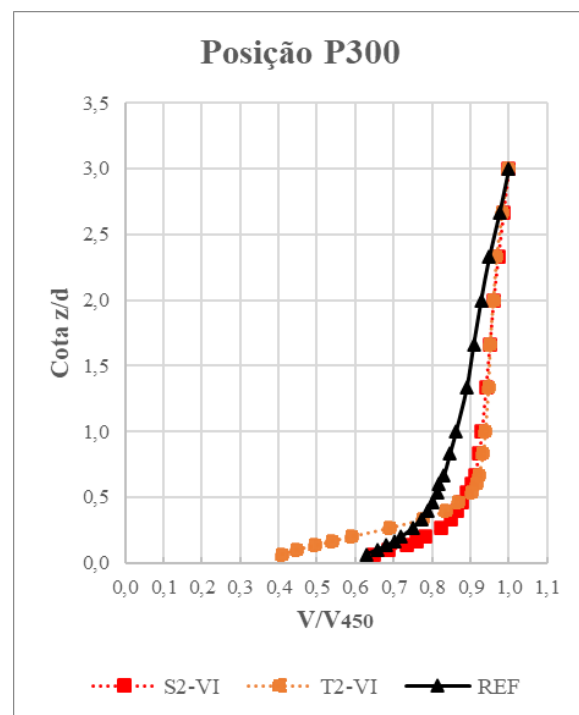


Figura A.46 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posições de medição P300.

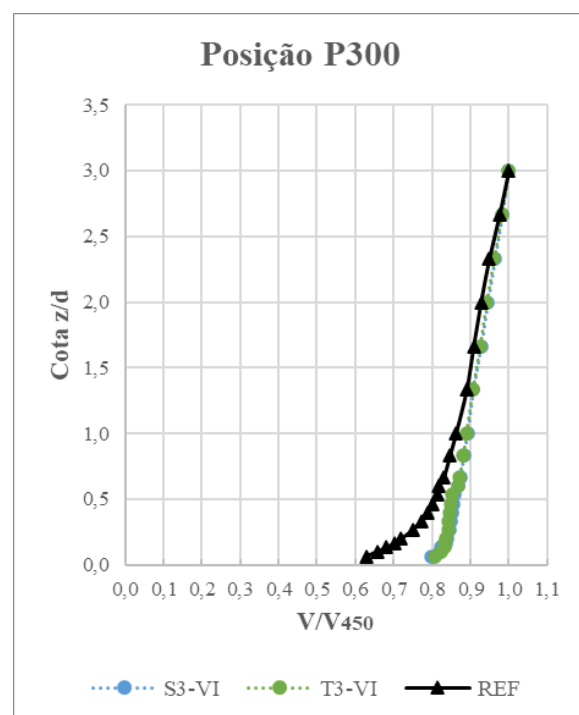
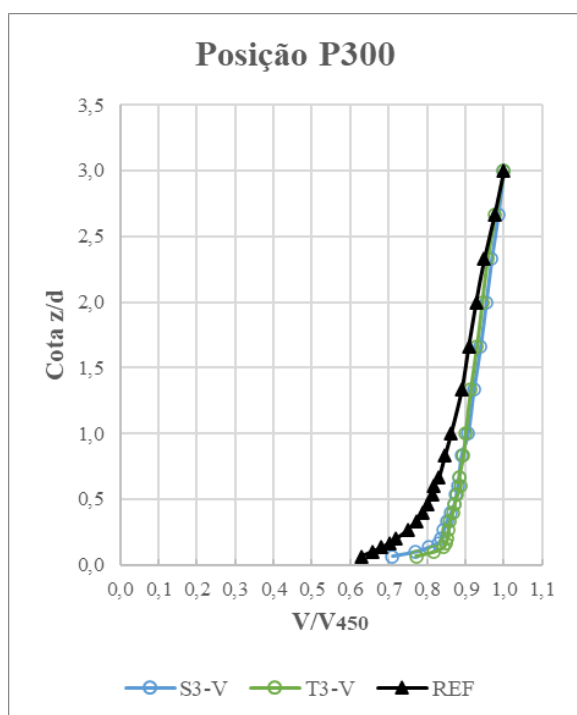


Figura A.47 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posições de medição P300.

Figura A.48 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 45°, posições de medição P300.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da extensão do cume do morro, para as posições de medição P450.

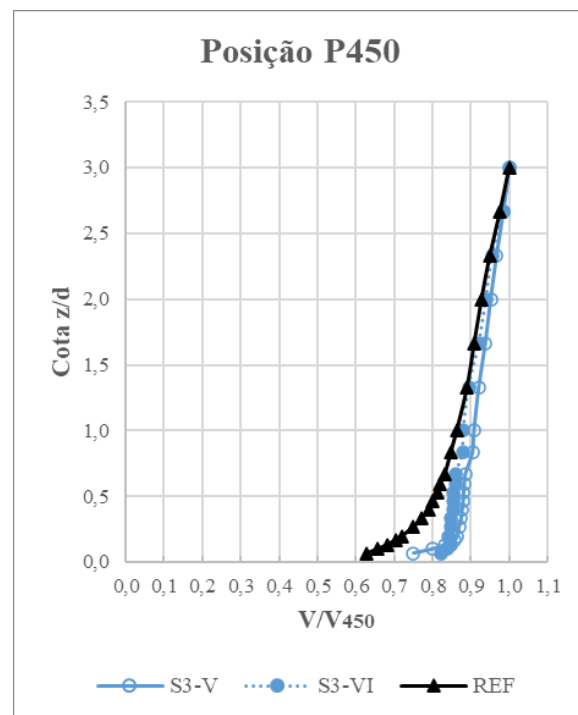
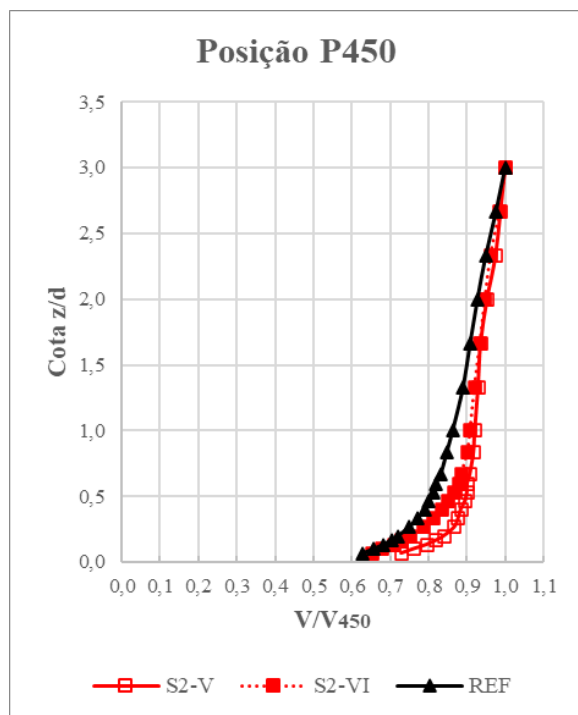


Figura A.49 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 2D, posições de medição P450.

Figura A.50 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo sinusoidal 3D, posições de medição P450.

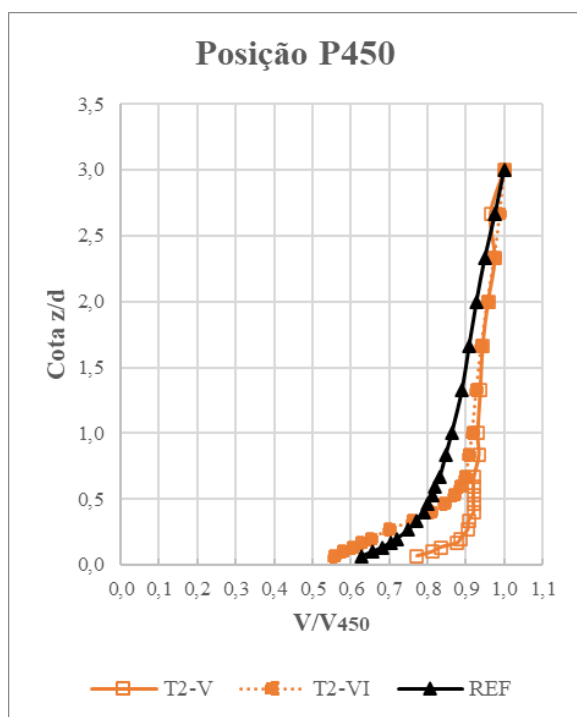


Figura A.51 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 2D, posições de medição P450.

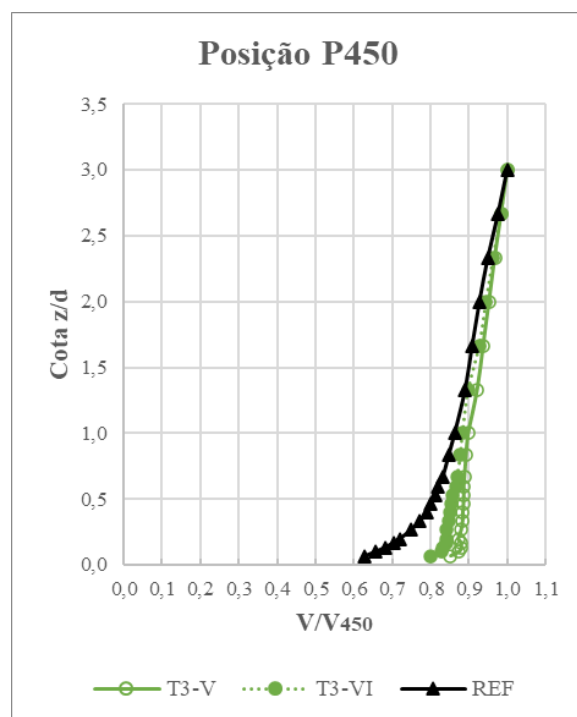


Figura A.52 – Comparação entre os ângulos de 20° e 45° do modelo triangular 3D, posições de medição P450.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da dimensionalidade 2D e 3D para a segunda etapa da pesquisa, para as posições de medição P450.

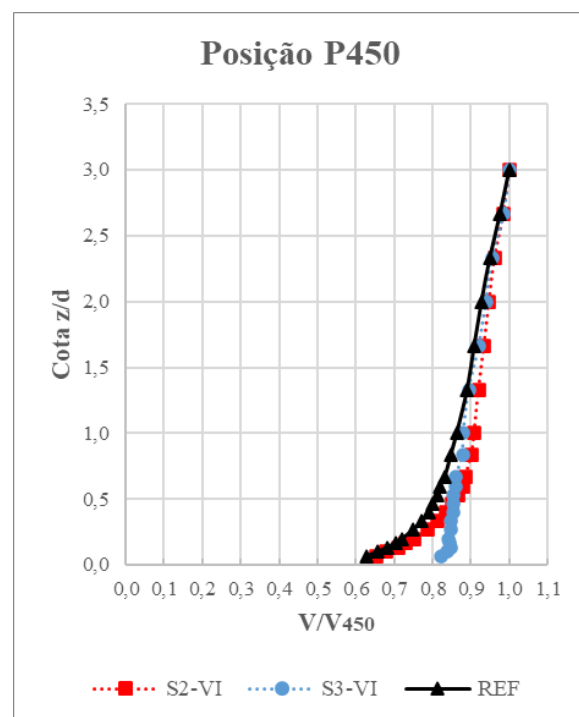
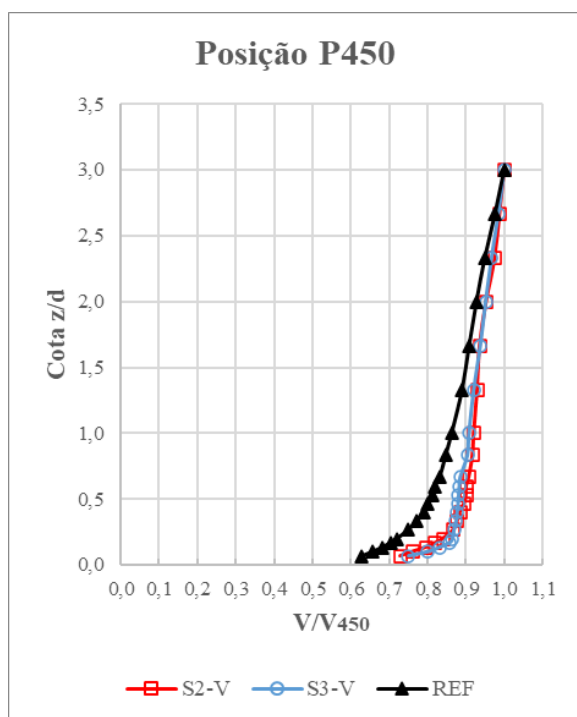


Figura A.53 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 20°, posições de medição P450.

Figura A.54 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 45°, posições de medição P450.

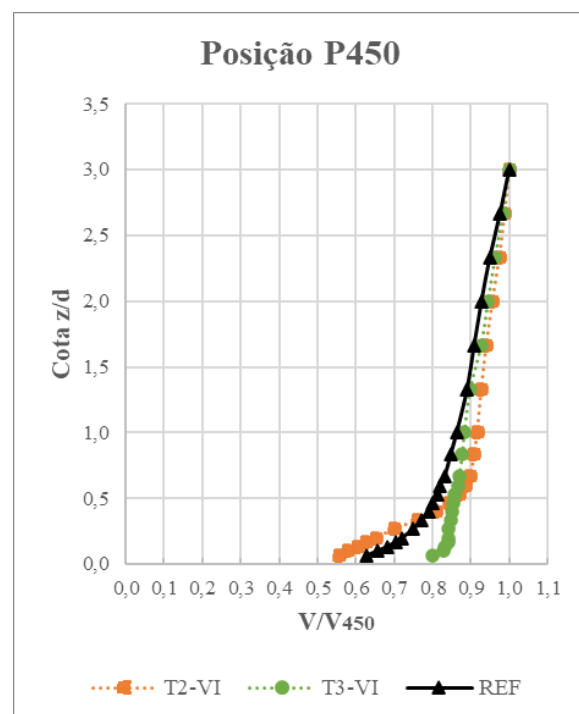
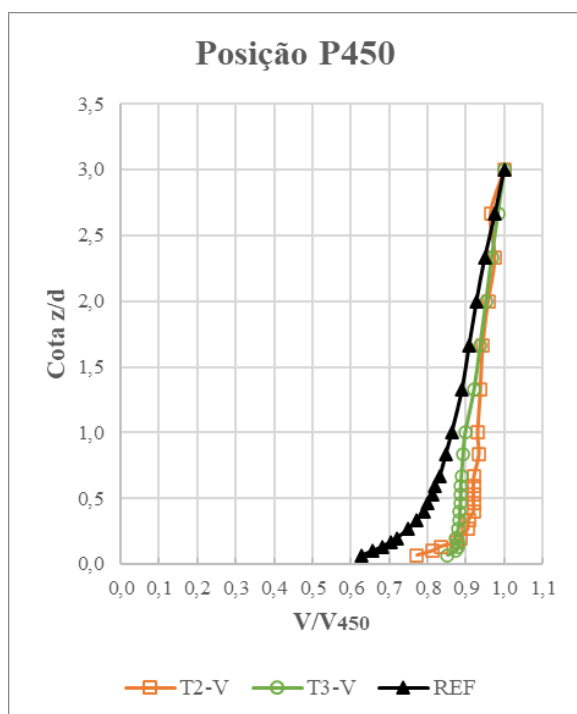


Figura A.55 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 20°, posições de medição P450.

Figura A.56 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 45°, posições de medição P450.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da seção transversal, para as posições de medição P450.

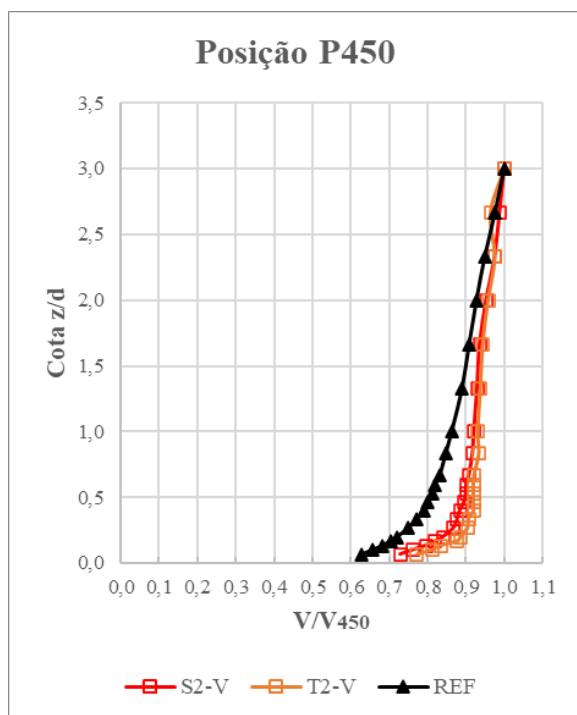


Figura A.57 – Comparação entre os modelos 2D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posições de medição P450.

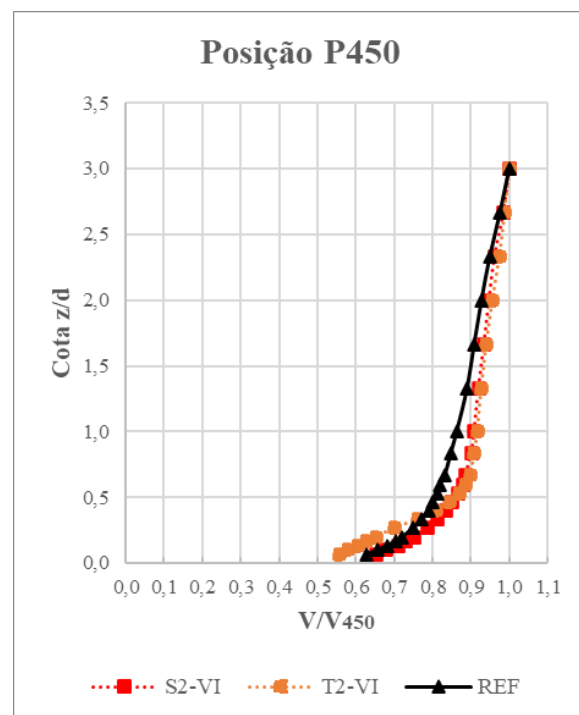


Figura A.58 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posições de medição P450.

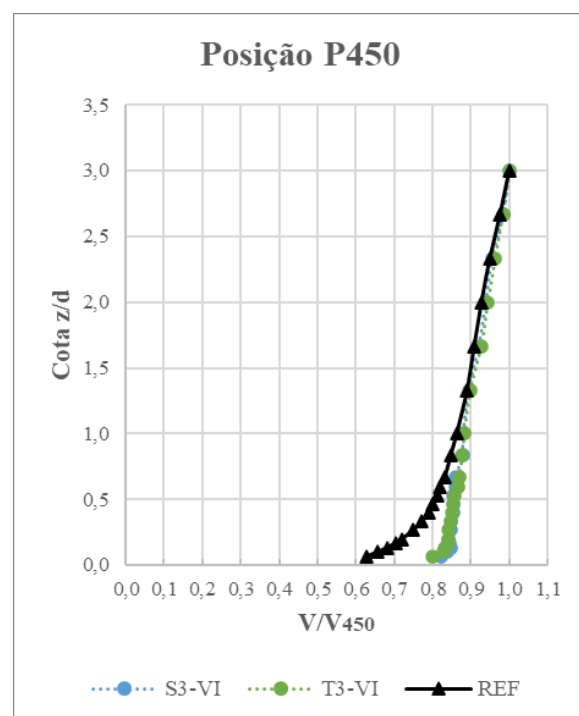
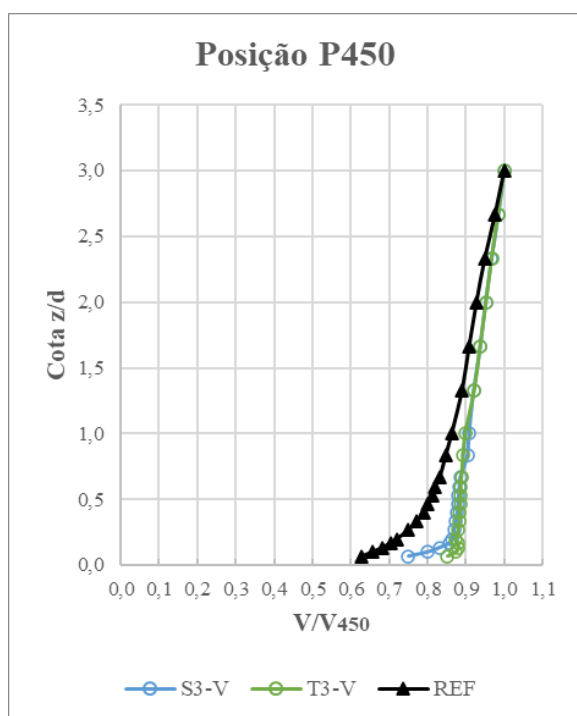


Figura A.59 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posições de medição P450.

Figura A.60 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 45°, posições de medição P450.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da dimensionalidade 2D e 3D para a segunda etapa da pesquisa, para a posição de medição S.

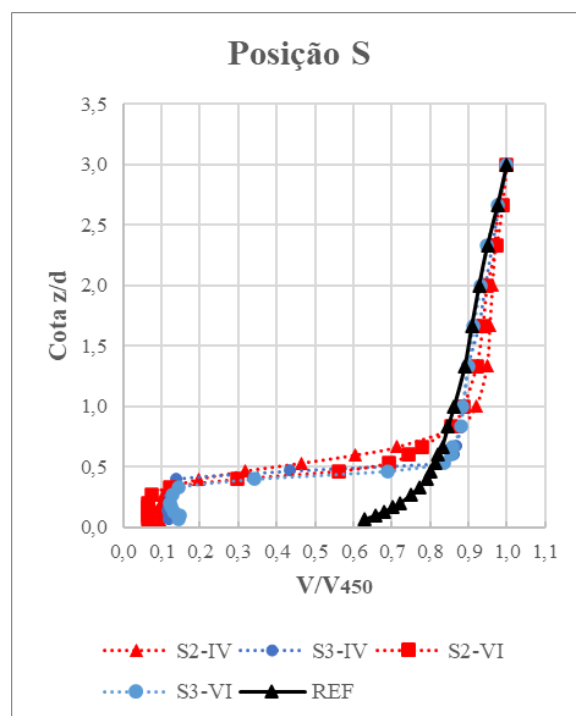
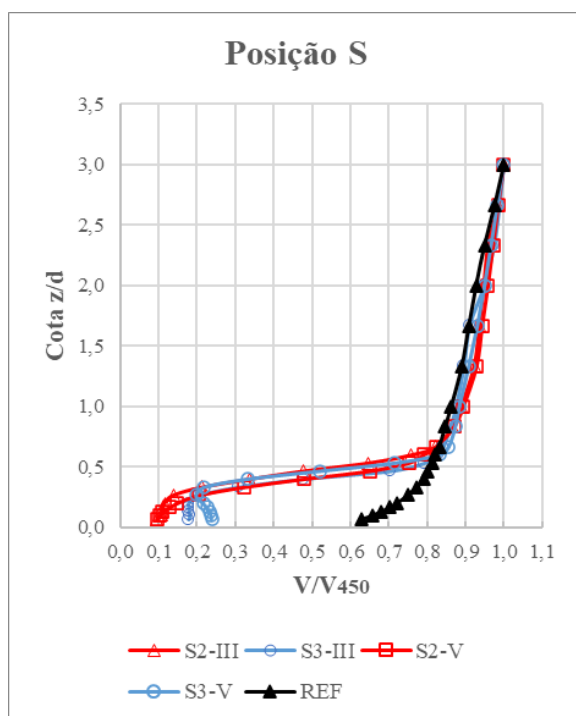


Figura A.61 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição S.

Figura A.62 – Comparação entre os modelos sinusoidal 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição S.

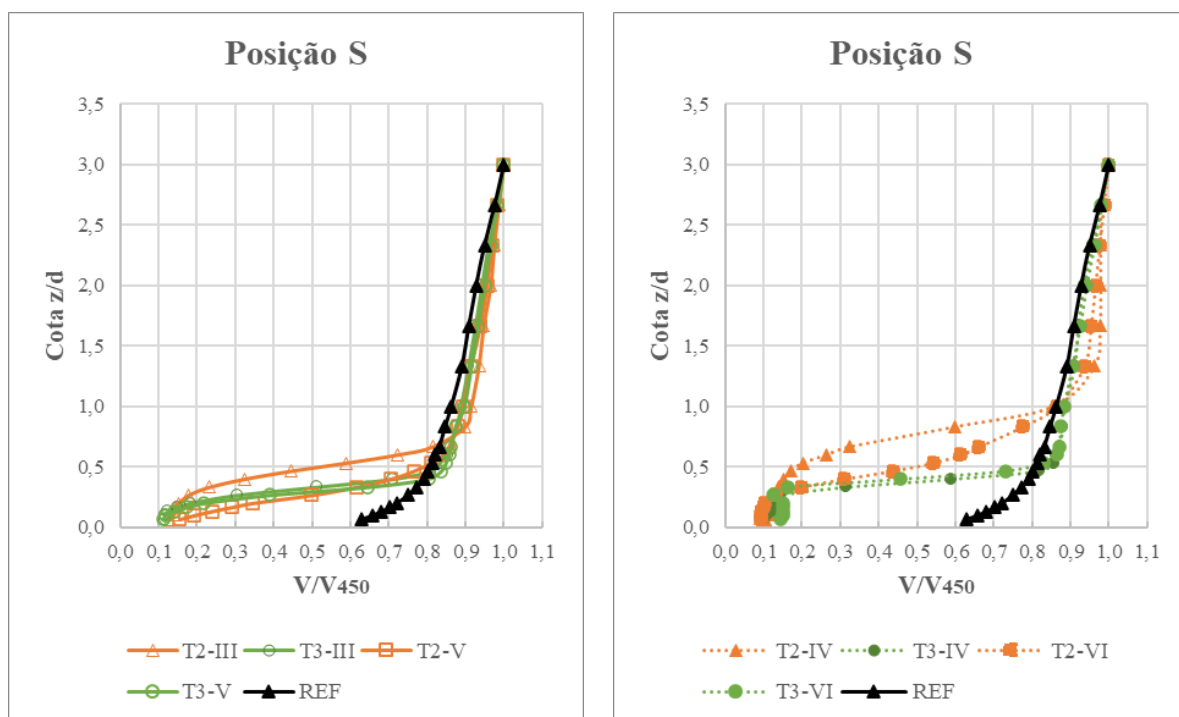


Figura A.63 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 20°, posição de medição S. Figura A.64 – Comparação entre os modelos triangular 2D e 3D para o ângulo de 45°, posição de medição S.

Estudo comparativo entre as medições experimentais dos modelos 20° e 45° para avaliar a influência da seção transversal, para a posição de medição S.

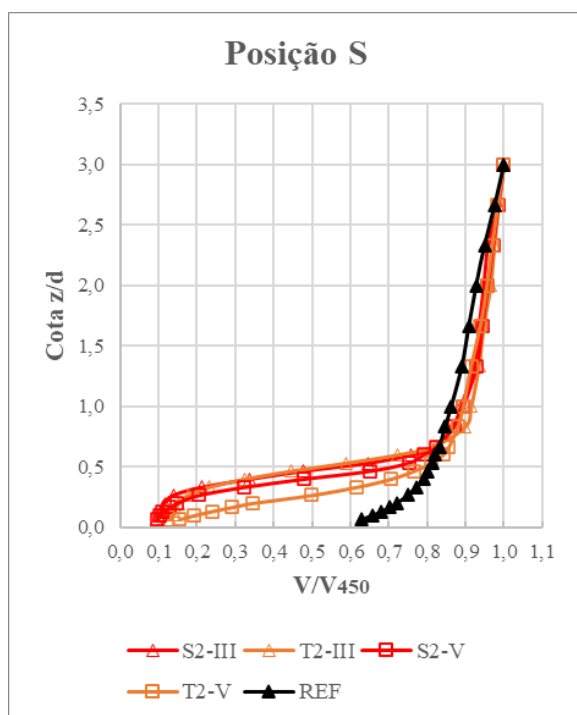


Figura A.65 – Comparação entre os modelos 2D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição S.

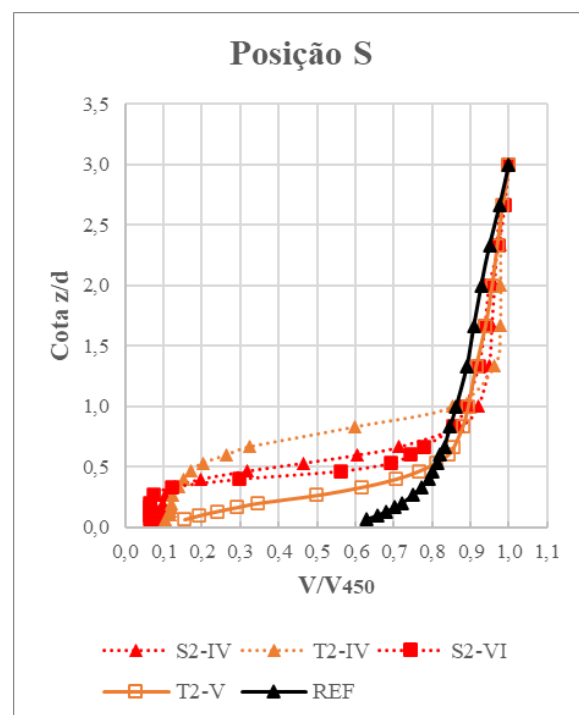


Figura A.66 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 45°, posição de medição S.

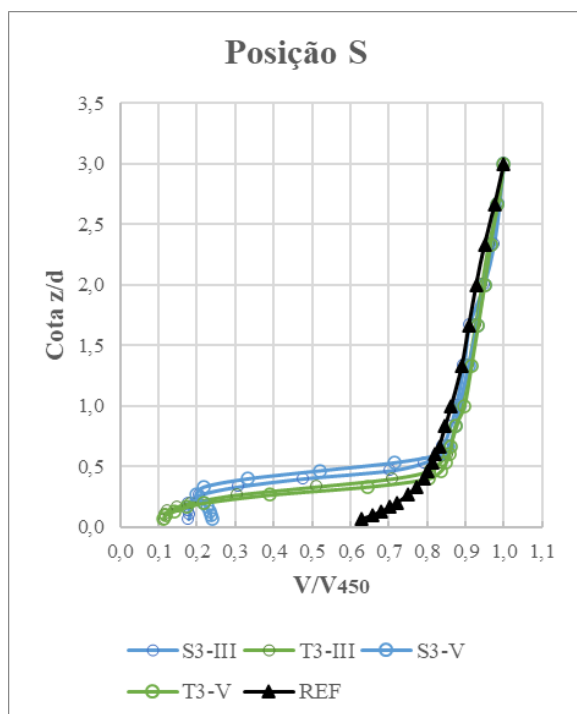


Figura A.67 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 20°, posição de medição S.

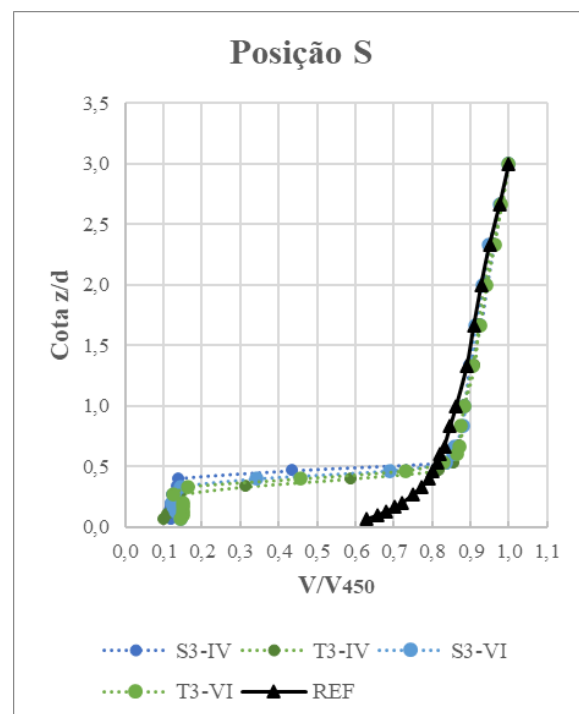


Figura A.68 – Comparação entre os modelos 3D sinusoidal e triangular para o ângulo de 45°, posição de medição S.