



Unesp – Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

ESTUDO NUMÉRICO PARA A DETERMINAÇÃO DAS
PRESSÕES DEVIDAS À AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIOS
INDUSTRIAIS

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil com ênfase em estruturas.

Candidato: Eng.º Stéfano Torres Manfrim

Orientador: Prof. Dr. Renato Bertolino Jr

Ilha Solteira, SP, Agosto de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

M276e	Manfrim, Stéfano Torres. Estudo numérico para a determinação das pressões devidas á ação do vento em edificios industriais / Stéfano Torres Manfrim – Ilha Solteira : [s.n.], 2006 112 p. : il. (algumas color.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de concentração : Estruturas, 2006 Orientador: Renato Bertolino Jr. Bibliografia: p. 83-84 1. Pressão do vento. 2. Edifícios – Aerodinâmica.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo Numérico para a Determinação das Pressões Devidas à Ação do Vento em Edifícios Industriais

AUTOR: STEFANO TORRES MANFRIM

ORIENTADOR: Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JUNIOR

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ROGÉRIO DE OLIVEIRA RODRIGUES

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROMERO GESUALDO

Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia - Uberlândia-MG

Data da realização: 21 de agosto de 2006.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JUNIOR

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo voto de confiança, espero nunca decepcioná-lo.

Ao Prof. Dr. Renato Bertolino Júnior que orientou este trabalho até o final. Gostaria de registrar aqui a maneira delicada, generosa e pertinente de sua orientação na condução dessa dissertação. Pela contribuição dada a minha formação acadêmica e profissional, e, sobretudo, pela amizade.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelo apoio financeiro ao trabalho.

À Universidade Estadual Paulista por colocar a minha disposição sua estrutura.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Civil FEIS/UNESP pelos bons momentos proporcionados.

Como sempre um agradecimento especial para minha família e minha namorada.

RESUMO

MANFRIM, S.T. (2006). Estudo numérico para a determinação das pressões devidas à ação do vento em edifícios industriais. Ilha Solteira, 2005. 112p. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Unesp Campus de Ilha Solteira.

O presente trabalho tem por objetivo obter numericamente os valores das distribuições de pressões devidas à ação do vento nas paredes e nos telhados de edifícios industriais. As distribuições de pressões nas paredes e nos telhados são determinadas através da simulação numérica, utilizando-se o programa ANSYS 9.0, considerando-se a interação fluido-estrutura. Para a simulação numérica, a geometria do edifício foi modelada tridimensionalmente, não possuindo nenhuma abertura e o fluido é o ar no qual a edificação está inserida. As distribuições de pressão foram determinadas para relações geométricas em planta do edifício, entre o comprimento e largura (a/b) iguais a 1.0, 1.5, 2.0 e 4.0. Para relações geométricas em elevação do edifício, entre a altura e largura (h/b), foram tomadas iguais a 0.5, 1.0, 1.5 e 2.0. A inclinação do telhado sempre foi considerada igual a 15° . Posteriormente, compararam-se os resultados numéricos obtidos na simulação através do ANSYS com os valores apresentados na norma NBR-6123:1988, a fim de verificar a viabilidade da utilização da simulação numérica para obtenção das distribuições de pressão em outras estruturas, determinando, assim, o seu comportamento estrutural.

Palavras-chave: análise estática, vento, velocidade, pressão, edifícios, fluido-estrutura.

ABSTRACT

The present work shows the pressures distributions values due the wind action in the walls and in the roofs on industrial buildings. The pressures distributions in the walls and in the roofs are determinate by numerical simulation environment, used the ANSYS 9.0 program, considering the interaction fluid-structure. For the numerical simulation, the geometry was considering in 3D dimensions, without opening in the industrial building. The pressures distributions were determined for the industrial buildings with geometry relations in floor by length and width ratio equal 1.0, 1y .5, 2.0, 4.0. In elevation, for geometric relations by width and height ratio was considered equal to 0.5, 1.0, 1.5, 2.0. The roof slope was considering constant like 15 degrees and the wind incidence like zero degrees, that is, in front of the industrial building.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Justificativa	12
1.2. Objetivo	12
1.3. Estruturação do Trabalho	13
2. RECENTES PESQUISAS.....	14
3. AÇÕES DEVIDAS AO VENTO	20
3.1. Ações Locais	20
3.2. Inclinação do Telhado.....	20
3.3. Formas e Proporções da Edificação.....	22
3.4. Pressões Flutuantes	23
3.5. Ventos Naturais	24
3.6. Velocidade do Vento.....	28
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS.....	30
4.1. Teorema da conservação de massa.....	30
4.2. Teorema de Bernoulli	31
4.3. Pressão Estática.....	32
4.4. Pressão Total	32
4.5. Pressão de Obstrução	33
5. EFEITO ESTÁTICO DEVIDO AO VENTO	34
5.1. Coeficientes de Pressão.....	34
5.2. Coeficientes de Forma.....	36
5.3. Coeficientes de Força.....	40
5.4. Coeficientes de Torção.....	41
5.5. Coeficientes de Pressão Interna.....	41
6. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	45
7. ENSAIOS NUMÉRICOS	50
7.1. Comparação entre Resultados	59
7.2. Interação Fluido-Estrutura	77
8. CONCLUSÕES.....	81
9. REFERÊNCIAS	83
ANEXO A – COEFICIENTES S_1 , S_2 E S_3 PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO.....	85
ANEXO B - VELOCIDADE NORMALIZADA S_2 E INTERVALO DE TEMPO	92
ANEXO C – MUDANÇA DE RUGOSIDADE DO TERRENO.....	97
ANEXO D – FATOR ESTATÍSTICO S_3 PARA A PROBABILIDADE P_m E VIDA ÚTIL DE EDIFICAÇÃO DE m ANOS.....	99
ANEXO E – GRÁFICO DE ISOPLETAS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO E PARA TODO O TERRITÓRIO NACIONAL	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Concepção Básicas de um Edifício Industrial.....	10
Figura 2 – Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann	15
Figura 3 – Modelo Reduzido do Edifício no Interior do Túnel de Vento.....	15
Figura 4 – Modelo Reduzido do Edifício e sua Vizinhança no Interior do Túnel de Vento	17
Figura 5 – Influencia da Forma do Fluxo nas Pressões	21
Figura 6 – Perfis de Pressão ao Longo do Eixo Longitudinal de uma das Águas em Telhados a Duas Águas. Ensaio no LAC	22
Figura 7 – Forças Tangenciais em Pavilhões Profundos	23
Figura 8 – Perfis de Velocidade Média do Vento (Km/h) de Acordo com a Rugosidade do Terreno, Segundo Davenport (apud Pitta, 2001).....	26
Figura 9 – Contorno de um Tubo de Corrente de um Fluido	30
Figura 10 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto	34
Figura 11 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto não Maciço com Abertura...	35
Figura 12 – Aberturas a Barlavento (a Esquerda) e a Sotavento (a Direita), em uma Edificação.....	42
Figura 13 – Geometria da Edificação e angulo de Incidência do Vento	45
Figura 14 – Geometria do elemento	46
Figura 15 – Discretização do Volume de Controle	48
Figura 16 – Condições de Contorno para o volume de controle.....	49
Figura 17 – Vista da distribuição dos coeficientes de pressão em um plano horizontal	50
Figura 18 - Vista da distribuição dos coeficientes de pressão de um plano vertical longitudinal no eixo da cumeeira	51
Figura 19 – Vista da distribuição dos coeficientes de pressão em um plano vertical perpendicular a cumeeira	51
Figura 20 – Campo de velocidade em um plano perpendicular a cumeeira a 0,5 metros da face de barlavento em m/s	52
Figura 21 – Campo de vetor velocidade em um plano horizontal no meio da edificação, em m/s	53
Figura 22 – Campo de velocidade em um plano longitudinal no eixo da cumeeira em m/s.....	53
Figura 23 – Campo de vetor velocidade em um plano longitudinal no eixo da cumeeira em m/s.....	54
Figura 24 – Campo de pressão em um plano vertical perpendicular a cumeeira no meio da edificação	54
Figura 25 – Campo pressão em um plano vertical perpendicular a cumeeira a 0,5 metros da face de barlavento	55
Figura 26 – Campo de pressão em um plano longitudinal no eixo da cumeeira	55
Figura 27 – Campo de pressão em um plano horizontal a 5 metros de altura	56
Figura 28 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação em um plano longitudinal no eixo da cumeeira	57
Figura 29 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação, em um plano vertical no meio da edificação	57

Figura 30 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação em um plano vertical a 0,5 metros da face da cumeeira.....	58
Figura 31 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação, em um plano horizontal.....	58
Figura 32 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (32-a) e pela NBR – 6123: 1988 (32-b)	59
Figura 33 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (33-a) e pela NBR – 6123: 1988 (33-b) na região A1 B1	59
Figura 34 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (34-a) e pela NBR – 6123: 1988 (34-b) na região A2 B2	60
Figura 35 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (35-a) e pela NBR – 6123: 1988 (35-b)	60
Figura 36 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (36-a) e pela NBR – 6123: 1988 (36-b) na região A1 B1	60
Figura 37 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (37-a) e pela NBR – 6123: 1988 (37-b) na região A2 B2	61
Figura 38 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (38-a) e pela NBR – 6123: 1988 (38-b)	61
Figura 39 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (39-a) e pela NBR – 6123: 1988 (39-b) na região A1 B1	61
Figura 40 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (40-a) e pela NBR – 6123: 1988 (40-b) na região A2 B2	62
Figura 41 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (41-a) e pela NBR – 6123: 1988 (41-b)	62
Figura 42 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (42-a) e pela NBR – 6123: 1988 (42-b) na região A1 B1	62
Figura 43 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (43-a) e pela NBR – 6123: 1988 (43-b) na região A2 B2	63
Figura 44 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (44-a) e pela NBR – 6123: 1988 (44-b)	63
Figura 45 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (45-a) e pela NBR – 6123: 1988 (45-b) na região A1 B1	63
Figura 46 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (46-a) e pela NBR – 6123: 1988 (46-b) na região A2 B2	64
Figura 47 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (47-a) e pela NBR – 6123: 1988 (47-b)	64
Figura 48 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (48-a) e pela NBR – 6123: 1988 (48-b) na região A1 B1	64
Figura 49 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (49-a) e pela NBR – 6123: 1988 (49-b) na região A2 B2	65
Figura 50 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (50-a) e pela NBR – 6123: 1988 (50-b)	65
Figura 51 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (51-a) e pela NBR – 6123: 1988 (51-b) na região A1 B1	65
Figura 52 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (52-a) e pela NBR – 6123: 1988 (52-b) na região A2 B2	66
Figura 53 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (53-a) e pela NBR – 6123: 1988 (53-b)	66
Figura 54 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (54-a) e pela NBR – 6123: 1988 (54-b) na região A1 B1	66

Figura 55 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (55-a) e pela NBR – 6123: 1988 (55-b) na região A2 B2	67
Figura 56 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (56-a) e pela NBR – 6123: 1988 (56-b)	67
Figura 57 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (57-a) e pela NBR – 6123: 1988 (57-b) na região A1 B1	67
Figura 58 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (58-a) e pela NBR – 6123: 1988 (58-b) na região A2 B2	68
Figura 59 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (59-a) e pela NBR – 6123: 1988 (59-b)	68
Figura 60 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (60-a) e pela NBR – 6123: 1988 (60-b) na região A1 B1	68
Figura 61 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (61-a) e pela NBR – 6123: 1988 (61-b) na região A2 B2	69
Figura 62 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (62-a) e pela NBR – 6123: 1988 (62-b)	69
Figura 63 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (63-a) e pela NBR – 6123: 1988 (63-b) na região A1 B1	69
Figura 64 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (64-a) e pela NBR – 6123: 1988 (64-b) na região A2 B2	70
Figura 65 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (65-a) e pela NBR – 6123: 1988 (65-b)	70
Figura 66 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (66-a) e pela NBR – 6123: 1988 (66-b) na região A1 B1	70
Figura 67 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (67-a) e pela NBR – 6123: 1988 (67-b) na região A2 B2	71
Figura 68 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (68-a) e pela NBR – 6123: 1988 (68-b)	71
Figura 69 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (69-a) e pela NBR – 6123: 1988 (69-b) na região A1 B1	71
Figura 70 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (70-a) e pela NBR – 6123: 1988 (70-b) na região A2 B2	72
Figura 71 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (71-a) e pela NBR – 6123: 1988 (71-b)	72
Figura 72 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (72-a) e pela NBR – 6123: 1988 (72-b) na região A1 B1	72
Figura 73 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (73-a) e pela NBR – 6123: 1988 (73-b) na região A2 B2	73
Figura 74 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (74-a) e pela NBR – 6123: 1988 (74-b)	73
Figura 75 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (75-a) e pela NBR – 6123: 1988 (75-b) na região A1 B1	73
Figura 76 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (76-a) e pela NBR – 6123: 1988 (76-b) na região A2 B2	74
Figura 77 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (77-a) e pela NBR – 6123: 1988 (77-b)	74
Figura 78 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (78-a) e pela NBR – 6123: 1988 (78-b) na região A1 B1	74
Figura 79 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (79-a) e pela NBR – 6123: 1988 (79-b) na região A2 B2	75

Figura 80 – Geometria, localização dos nós e o sistema de coordenadas do elemento.....	77
Figura 81 – Discretização da região fluídica.....	78
Figura 82 – Discretização da Estrutura	79
Figura 83 –Deslocamentos.....	80
Figura 84 – Tensão de Von Mises.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala Beaufort: Velocidade do Vento e seus Efeitos. Fonte: Pitta (2001).	25
Tabela 2 – Coeficientes de Pressão e de Forma, Externos, para Paredes de Edificações de Planta Retangular. Fonte: NBR 6123:1988.....	37
Tabela 3 – Coeficientes de Pressão e de Forma, Externos, para Telhados com Duas Águas, Simétricos, em Edificações de Planta Retangular. Fonte: NBR 6123:1988	38
Tabela 4 – Coeficientes de Pressão Interna para Proporções de Área de Todas as Aberturas na Face de Barlavento e a Área Total das Aberturas	43
Tabela 5 – Coeficiente de Pressão Interna para Proporção entre a Área da Abertura Dominante e a Área Total das Outras Aberturas.....	44
Tabela 6 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos através do programa ANSYS e da NBR 6123:1988.....	76

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, com o aumento da industrialização no Brasil, houve um aumento considerável de edifícios industriais instalados pelo país.

Nos grandes centros industriais, e até em zonas rurais, as edificações estão fazendo parte da paisagem e tendem a se espalhar cada vez mais pelo país, integrando uma categoria estrutural das mais utilizadas em nossos dias.

Edifícios industriais são construções que tem por finalidade cobrir grandes áreas destinadas a diversos fins, como fábricas, oficinas, almoxarifados, depósitos, hangares, etc. Geralmente são construídos de concreto armado, concreto protendido e de perfis de aço, possuindo cobertura metálica que podem ser do tipo: uma água, duas águas, quatro águas, coberturas curvas e também tipo shed.

A Figura 1 ilustra a concepção de um edifício industrial:

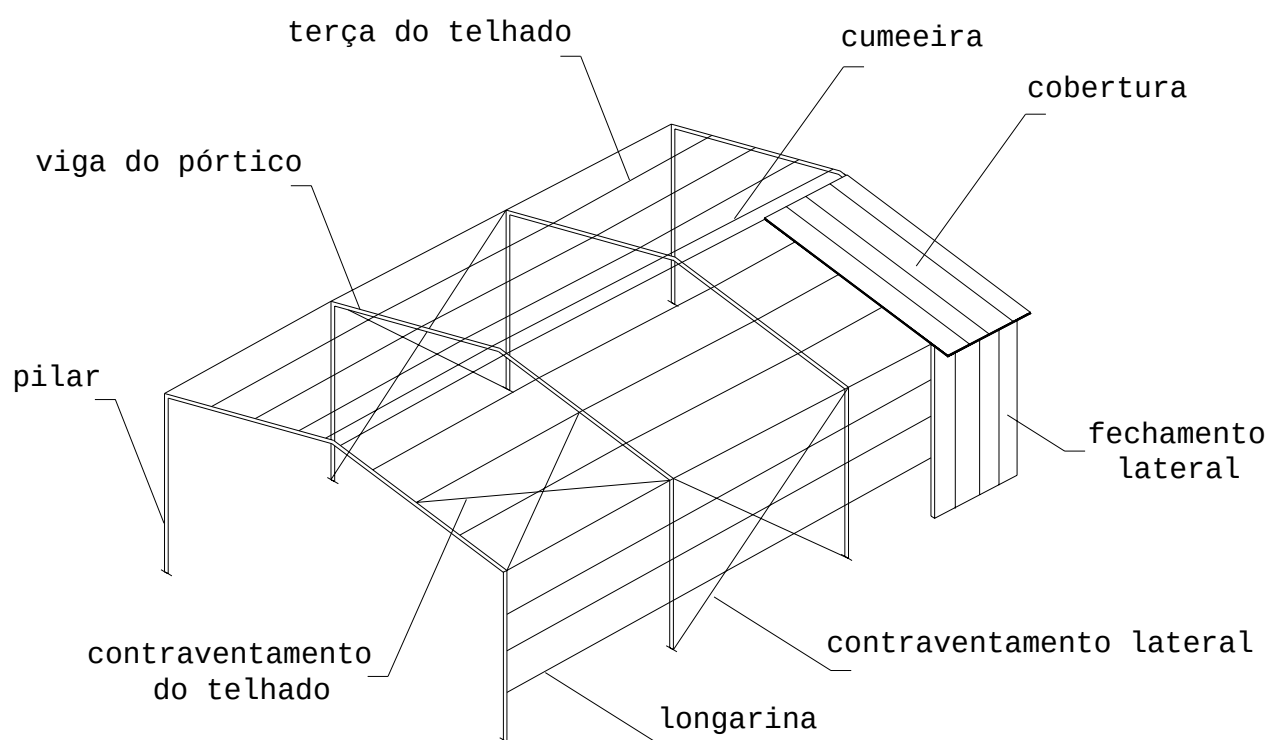


Figura 1 – Concepção básicas de um edifício industrial

Os edifícios industriais projetados estão normalmente submetidos a ações permanentes e variáveis. As ações permanentes (composta pelo peso próprio da estrutura e pelo peso dos materiais de acabamento) são usualmente fáceis de serem tratadas, pois dependem somente das seções transversais e dos elementos

que compoem a estrutura. Já as ações variáveis, sobrecarga, vento ou de outras causas, apresentam um maior grau de dificuldade, pois dependem do tipo de edificação a ser construída e de sua geometria.

Por meio da análise estrutural determinam-se quais são os perfis estruturais a serem utilizados nos elementos estruturais (pilares, vigas e etc) dos edifícios industriais.

Para garantir um bom funcionamento do sistema estrutural deve-se executar corretamente o projeto da edificação, dentro das atuais tecnologias e dos atuais desenvolvimentos científicos dos quais deu origem a atualização nas normas técnicas.

Nem sempre a velocidade mais desfavorável é a velocidade máxima prevista para o vento, NBR 6123 (ABNT,1988). Para baixas velocidades, o regime de escoamento é laminar e os efeitos resultantes são praticamente, de natureza estática. A partir de velocidades da ordem de 25 m/s (90 km/h) o regime torna-se turbulento e atua por rajadas sucessivas, podendo ter caráter periódico, segundo Oliveira (1974).

A norma brasileira NBR 6123 (ABNT,1988), Forças Devidas ao Vento em Edificações, permite que as ações dinâmicas do vento que atuam em edifícios esbeltos, sejam consideradas como ações estáticas, bastando determinar a frequência e conseqüentemente o período fundamental da edificação, dispensando a análise dinâmica propriamente dita, se o mesmo for inferior a um segundo.

O efeito estático da ação do vento leva em consideração apenas o coeficiente de arrasto e a pressão de obstrução, enquanto que o efeito dinâmico do vento é devido à turbulência atmosférica.

Essa resposta dinâmica da estrutura à ação do vento depende não só de sua forma externa, mas também dos materiais empregados, do amortecimento e da rigidez da estrutura.

Os valores dos esforços solicitantes devidos ao efeito dinâmico da ação do vento são superiores aos valores dos efeitos estáticos, e isso mostra que para projetos onde se procura minimizar os custos de construção oferecendo maiores níveis de segurança, deve-se obrigatoriamente submetê-las aos efeitos dinâmicos da ação do vento para obter-se uma análise estrutural mais próxima da realidade, Bertolino et al (2000).

Uma forma de considerar os efeitos dinâmicos na resposta dessas estruturas é através do método do fator de resposta de rajada sugerido por Davenport apud Blessmann (1998).

1.1. Justificativa

A proposta do presente trabalho é realizar um estudo em edifícios industriais sob a ação do vento, para conhecer o campo de velocidade e a distribuição de pressões nessas edificações.

Segundo Loredou-Souza (2004), um dos processos preventivos de menor custo e de maior eficiência, levando-se em consideração a ação do vento, é obtido a partir da etapa de concepção, de onde se obtém maiores níveis de segurança e confiabilidade. Por essa razão simulações numéricas da edificação ao ar livre foram realizadas através do programa ANSYS 9.0, disponível no Departamento de Engenharia Civil, onde serão comparados os resultados obtidos numericamente pela simulação com os resultados estimados a partir da norma brasileira NBR 6123 (ABNT,1988).

1.2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo determinar numericamente, por meio do programa ANSYS, os coeficientes e a distribuição de pressão devida à ação do vento nas paredes e nos telhados de edifícios industriais, e posteriormente compará-los com os coeficientes obtidos pela NBR-6123: 1988 a fim de validar a utilização do programa Ansys para obtenção dos coeficientes de pressão em diversas estruturas. A simulação numérica será tridimensional e os resultados serão obtidos tanto no plano do telhado(horizantal) como também nos planos longitudinal e transversal.

1.3. Estruturação do Trabalho

Para atingir os objetivos propostos, esta dissertação foi dividida em nove itens cujos conteúdos são apresentados na sequência:

Seção 1: Apresenta uma introdução sobre o assunto que é objeto de estudo deste trabalho de pesquisa, assim como a proposta do presente trabalho;

Seção 2: Relaciona as pesquisas realizadas sobre o tema;

Seção 3: Apresenta pesquisa bibliográfica;

Seção 4: Apresenta os fundamentos teóricos básicos para um bom entendimento dos efeitos do vento na edificação;

Seção 5: Apresenta os efeitos estáticos devidas à ação do vento;

Seção 6: Apresenta a descrição dos modelos numéricos utilizados para a simulação numérica do modelo das edificações;

Seção 7: Apresenta os ensaios numéricos, assim como os resultados e a comparação entre os valores obtidos pelo programa ANSYS e os valores obtidos pela NBR-6123;

Seção 8: Apresenta as conclusões finais sobre os estudos efetuados e também algumas propostas para a confecção de trabalhos futuros;

Seção 9: Referências.

2. RECENTES PESQUISAS

Vários pesquisadores realizaram estudos da ação dos ventos em edificações, onde esses têm apresentado resultados interessantes da ação estática do vento em edifícios em modelo reduzido.

Estudos muito interessantes foram realizados em Blessmann (2004) em telhados a quatro águas.

Outros pesquisadores, em trabalhos semelhantes, já tinham constatado que a utilização de telhado a quatro águas resiste melhor à ação do vento do que telhados a duas águas.

Foi verificado por Blessmann (2004) que quando se utiliza telhado a quatro águas, os pontos de sucção em alguns casos chegam a reduzir à metade do seu valor, evitando assim a ocorrência do arrancamento de telhas como no caso de telhados em duas águas. Ele ressalta que uma das vantagens da utilização de telhado de quatro águas é que esses distribuem a ação do vento nas quatro paredes, enquanto que telhados de duas águas distribuem apenas nas suas laterais.

Em sua pesquisa, Blessmann (2004) também examinou a influência causada pelas platibandas e pelos beirais, assim como a influência da inclinação do telhado e da altura das paredes na análise da ação do vento na edificação. Ele constatou que menores valores (algébricos) aparecem nas coberturas com inclinação igual a 30°, a sotavento. Tanto em paredes baixas quanto em paredes altas, verificou-se que o menor valor ocorreu em coberturas com beirais.

Quanto à influência das platibandas, Blessmann (2004) averiguou que para certas incidências do vento e em certas regiões da cobertura, as sucções atingiram valores superiores quando se utilizou platibandas pequenas, em relação a telhados sem platibandas. Com relação a pontos de ocorrência de sucção, foi observado que os maiores valores ocorrem em modelos com paredes altas e com inclinação do telhado igual a 15°. Observou-se também que a utilização das platibandas traz um efeito benéfico para a estrutura.

Loredou-Souza et al (2004) também realizou alguns trabalhos muito interessantes do ponto de vista aerodinâmico. Por não existirem coeficientes aerodinâmicos específicos para as configuração e disposições das edificações em normas de vento, Loredou-Souza et al (2004) realizou ensaios em túnel de vento no

Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde simularam através do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, modelos reduzidos de um edifício de 120 metros de altura que será construído na cidade de São Paulo; uma proposta de cobertura do Estádio Castelão, localizado em Fortaleza - Ceará e um modelo de 4 edifícios altos de concreto armado a serem construídos em Alphaville, Barueri, SP.

A Figura 2 representa o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann e a Figura 3 o modelo reduzido do edifício no interior do túnel de vento onde pode-se observar os simuladores de rugosidade.



Figura 2 – Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann. Fonte: Loredo-Souza (2004)



Figura 3 – Modelo Reduzido do Edifício. Fonte: Loredo-Souza (2004)

No estudo do edifício de 120 metros de altura que será construído na cidade de São Paulo, Loredou-Souza et al (2004) relata que a presença de edifícios altos na vizinhança aumenta consideravelmente as respostas tanto na direção do vento quanto na direção transversal. Ele também observou essa presença no edifício Citibank, na Avenida Paulista, em São Paulo, onde a presença dos edifícios vizinhos chegou a aumentar cerca de 125% os efeitos do vento para certas condições de incidência do vento, com relação ao que sofreria se eles não existissem.

Loredou-Souza et al (2004) ainda cita que algumas modificações aerodinâmicas na forma da edificação, tal como eliminação das arestas vivas, pode trazer benefícios, diminuindo em até 40% a resposta na direção do vento.

Com relação à proposta para a cobertura do Estádio Castelão, localizado em Fortaleza/Ceará, Loredou-Souza et al (2004) diz que os coeficientes de pressão obtidos no ensaio são coerentes do ponto de vista aerodinâmico com relação à forma da estrutura. Ele observou que em zonas restritas da edificação (próxima às bordas) aparecem valores elevados de sucção externas em algumas incidências do vento, porém esses valores elevados de sucções não aparecem ao mesmo tempo em toda região e são usadas principalmente para verificação, ancoragem e dimensionamento de elementos de vedação e da estrutura secundária.

Com relação à ação estática do vento sobre o conjunto de 4 edifícios altos de concreto armado a serem construídos em Alphaville, Barueri-SP, Loredou-Souza et al (2004) ressalta que os valores dos coeficientes de força e de torção obtidos dos ensaios em túnel de vento são coerentes do ponto de vista aerodinâmico com relação à forma do prédio estudado e de sua vizinhança, da mesma forma que foi observado em outros estudos efetuados por ele.

Normalmente coeficientes aerodinâmicos referem-se a construções isoladas. Entretanto, edificações situadas nas proximidades podem causar efeitos ponderáveis de interação, aumentando as sucções, forças e momentos de torção.

Próximos ao modelo instrumentado foram reproduzidos as edificações mais próximas, na escala do modelo, para que as condições de escoamento próximas ao edifício correspondessem o mais fielmente possível às condições reais às quais a edificação estará sujeita depois de concluída (figura 4).

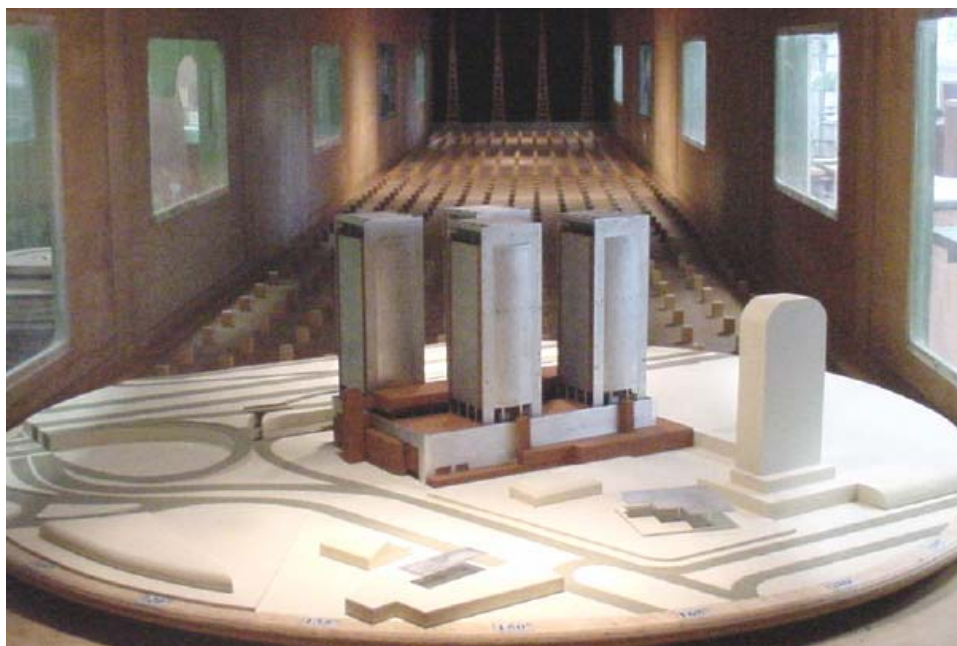


Figura 4 – Modelo Reduzido do Edifício e sua Vizinhança no Interior do Túnel de Vento Fonte: Loredó-Souza (2004)

Com o decorrer dos anos, Loredó-Souza et al (2004) adverte que existe uma tendência de aumento da rugosidade das zonas construídas devido a prováveis futuras urbanizações, o que poderá causar alguma redução nos esforços estáticos em algumas zonas da edificação. Por outro lado, possíveis efeitos nocivos de vizinhanças futuras também podem ocorrer. Ele ainda cita que a presença de edifícios altos na vizinhança pode aumentar as respostas tanto na direção do vento como transversalmente a esse, além dos efeitos de torção, em geral em torno de 30% a 40%, podendo, entretanto resultar em aumentos muitíssimo superiores para certas posições críticas de separação do escoamento, bem como de seu posicionamento e forma.

Carril et al (2004) apresentou um trabalho sobre o estudo da ação do vento na cobertura do Centro de Eventos Esportivos e Culturais Pe. Vitor Coelho que está sendo construído em Aparecida do Norte, São Paulo.

Devido a não existência de coeficientes aerodinâmicos específicos para a forma dessa edificação em normas de vento, seu ensaio foi realizado no Túnel de Vento de camada limite do centro de metrologia de fluidos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo.

A cobertura a ser ensaiada é curva, com algumas protuberâncias e possui uma forma oval com comprimento real de aproximadamente 150 metros e 100 metros de largura, tendo 37 metros de altura.

Da mesma forma que Loredó (2004), Carril et al (2004) verificou que valores altos de sucção aparecem em zonas restritas da edificação (próxima às bordas).

Segundo Carril et al (2004), os valores dos coeficientes de pressão obtidos foram coerentes do ponto de vista aerodinâmico em relação à forma da edificação. Em seu estudo, ele também verificou que a presença de domos ao longo da superfície externa da cobertura, altera apenas localmente as pressões. Já os coeficientes de pressão externa pouco modificaram com a presença ou não de domos.

Ho et al (2004) descrevem os modelos básicos, configurações de testes, as simulações de vento e formato padrão para a distribuição e análise dos dados em teste de túnel de vento para o modelo de edificações básicas. Apresentaram também uma comparação de seus dados com condições de pressão de vento existente em normas de edificações.

Comparações paramétricas baseadas na inclinação do telhado, na altura da edificação e na sua dimensão plana mostram que os dados obtidos dentro do estudo foram consistentes com o comportamento aerodinâmico esperado.

Uma outra comparação feita entre o teste de túnel de vento por Ho et al (2004) e os dados em escala real obtidos pela Texas Tech University (TTU) mostraram comportamentos semelhantes, mas no teste do túnel não foi possível produzir valores máximos de sucção perto da aresta do telhado.

Portela e Godoy (2004) estudaram tanques com telhados cônicos sofrendo ação do vento, onde o telhado é sustentado por vigas e colunas. Eles observaram que a flambagem ocorre por flexão na casca cilíndrica, cujo modo de flambagem localiza-se na região de barlavento. As pressões de vento obtidas nos experimentos em túnel de vento, realizados como parte de sua pesquisa, foram obtidas para geometrias de tanques dos quais informações prévias ainda não eram disponíveis.

Em seus resultados, Portela e Godoy (2004) verificaram alta sensibilidade de imperfeições dos tanques com telhados cônicos e valores de flambagem para velocidades de vento na mesma ordem daquelas esperadas ocorrerem na região onde iriam ser instalados. Foi observado que as pressões nas paredes são menores em tanques mais baixos com relação de espectro (h/D) de 0,4 a 0,5. Observaram

também que tanques com telhados cônicos possuem um maior valor de flambagem do que tanques similares sem telhados, no entanto a redução da carga de flambagem devido à influência de pequenas imperfeições geométricas é maior em tanques com telhados cônicos. O telhado de um tanque oferece rigidez adicional para a estrutura, tal que a capacidade de flambagem do tanque com telhado cônico é aumentada por um fator de duas vezes em relação a um tanque sem telhado.

Sharma e Richards (2004) investigaram as características das pressões do vento sobre as áreas do telhado de uma edificação com duas aberturas em diferentes posições na face de barlavento.

Estudos efetuados em túnel de vento na Universidade de Tecnologia do Texas foram realizados para um modelo na escala 1:50 na região do canto e da cumeeira na edificação, próximo as aberturas localizadas no centro e no canto da parede frontal.

Os coeficientes de pressão máximos e médios, bem como a relação entre a pressão externa e interna do telhado foram obtidos para uma variação do ângulo de incidência do vento na edificação de 0 a 360°.

Os resultados mostraram que os coeficientes de pressão máxima e média são particularmente aumentados em relação aos coeficientes de pressão do telhado quando da incidência do vento na edificação com ângulo de $\pm 50^\circ$.

3. AÇÕES DEVIDAS AO VENTO

3.1. Ações Locais

Difícilmente se observa o colapso total de uma estrutura devido à ação do vento. Em geral, quando isso acontece, o colapso é causado por falhas locais. Por isso é importante tanto do ponto de vista econômico como estrutural, estudar cuidadosamente as ações locais causadas pelo vento.

Segundo Blessmann (2001), as ações locais mais violentas são causadas por dois vórtices de topo que aparecem com o vento soprando a 45° . A sucção causada por esses vórtices é responsável pelo arrancamento dos telhados na região mais solicitada, próximo a quina de barlavento. Ele acrescenta que sucções altas também aparecem na região de barlavento, com vento de aproximadamente 15° .

Por meio de ensaios de túneis de vento, vários pesquisadores conseguiram medir valores dessas altas sucções.

3.2. Inclinação do Telhado

A inclinação do telhado nas águas de barlavento influi tanto nas sucções locais para ventos agindo obliquamente, quanto para valores máximos de sucção e sobrepressão incidindo perpendicularmente à cumeeira. Em ventos a 90° , contrariamente a algumas normas ainda em uso, Blessmann (2001) verificou experimentalmente que maiores sucções podem aparecer em telhados com inclinação entre 8° e 12° . Com o aumento da inclinação essas sucções tendem a diminuir. Em certas partes da cobertura, quando a inclinação é superior a 35° ocorre sobrepressão.

Sucções muito altas podem aparecer também próximas à cumeeira causando arrancamento de telhas.

Outra característica da edificação que influencia muito a pressão na cobertura é a altura das paredes.

A Figura 5 ilustra a influência dessas características na forma do fluxo. Na região de barlavento podem-se distinguir duas regiões: uma influenciada pela

rugosidade e pelo fluxo de pressão existente na parede de barlavento causando redemoinhos cônicos (vórtice de base). A outra (fluxo livre) tem suas linhas de corrente desviadas pela edificação e pelo vórtice de base. Entre essas duas regiões, existe uma “superfície de separação”, a qual a tangente no ponto de contato dessa com o telhado indica se haverá ou não sobrepressão no telhado a barlavento. Se essa tangente for menor que a inclinação do telhado, aparecerá sobrepressão na água de barlavento (Figura 5a). Caso seja mais inclinada que o telhado, aparecerá sucção na parede de barlavento (Figura 5b). Já nas águas de sotavento, aparecerá somente sucção.

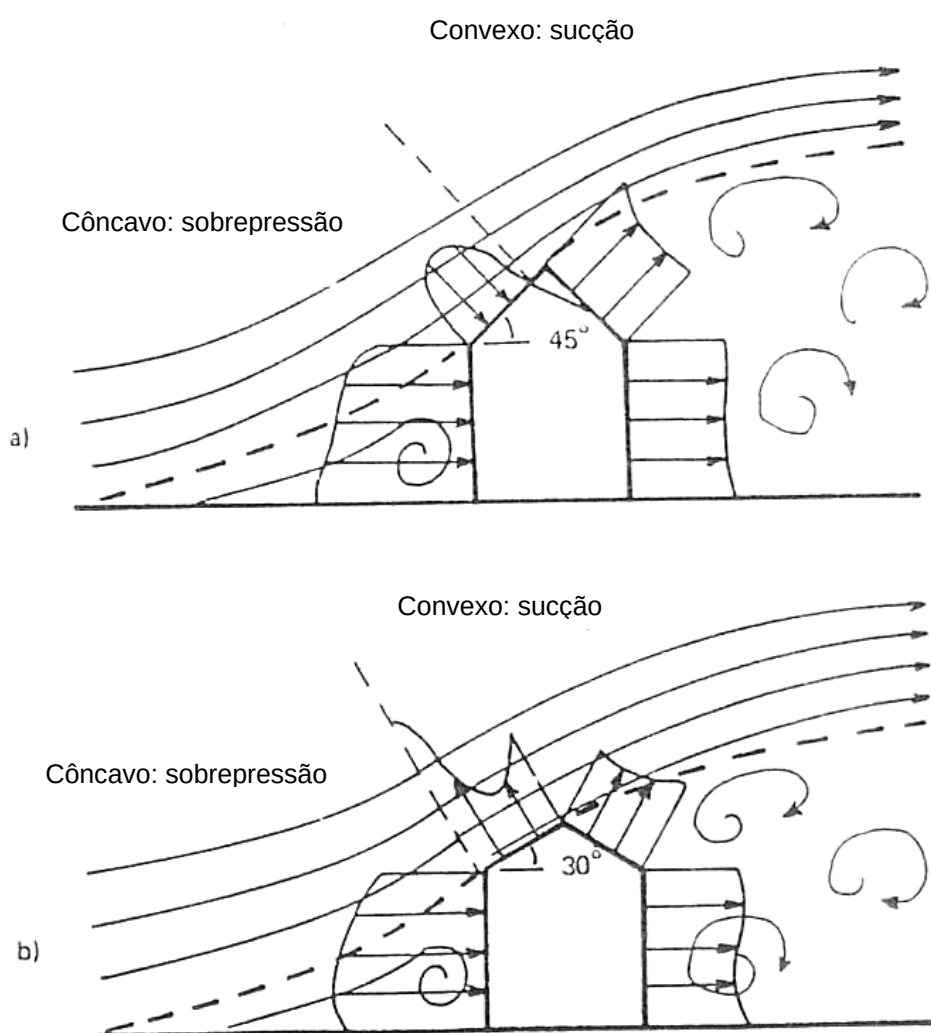


Figura 5 – Influencia da Forma do Fluxo nas Pressões. Fonte: Pitta (1991)

3.3. Formas e Proporções da Edificação

Quando o vento incide paralelamente à cumeeira, sucções muito altas podem ser encontradas tanto em telhados quanto em paredes, devido à forma e proporção da edificação.

Dependendo da profundidade da edificação, o “bulbo” de altas sucções diminui rapidamente aproximando-se de zero; em alguns casos, pode-se notar o surgimento de pequenas sobrepressões.

A figura 6 mostra o bulbo de altas sucções na zona da parede a barlavento de uma das águas, obtidas em um ensaio realizado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

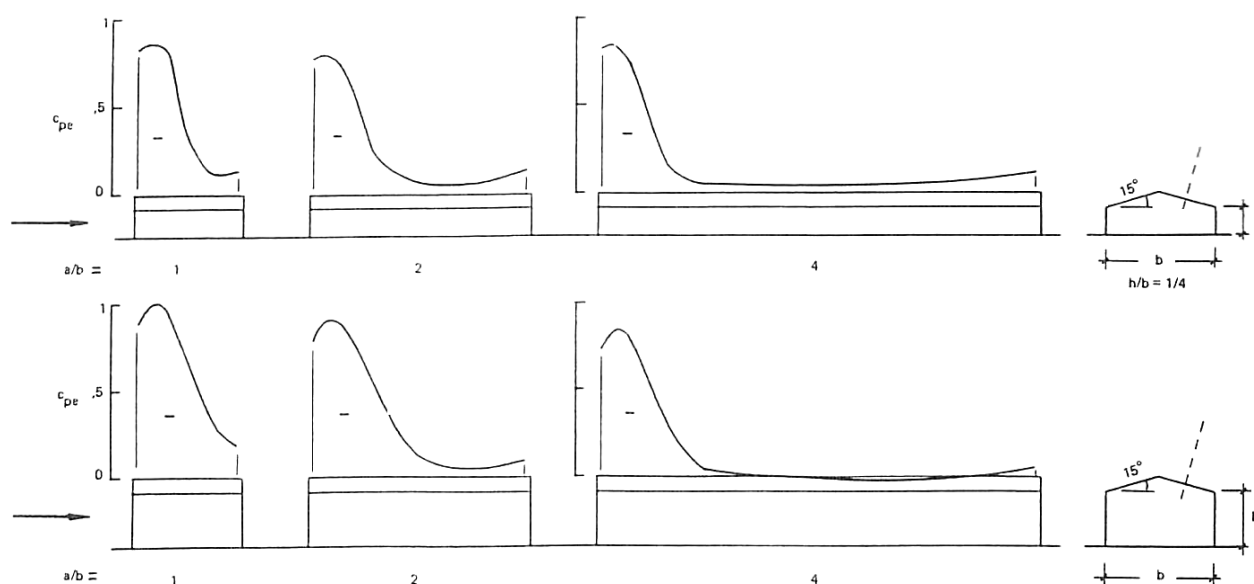


Figura 6 – Perfis de Pressão ao Longo do Eixo Longitudinal de uma das Águas em Telhados a Duas Águas. Ensaio no LAC. Fonte: Pitta (1991)

Um recolamento de fluxo que se separou nas arestas de barlavento pode ocorrer se a profundidade da edificação for suficientemente grande. Nessa região de recolamento devem ser considerados os efeitos das forças tangenciais tanto na cobertura quanto nas paredes.

Essas forças aparecem nas paredes e nas coberturas quando a profundidade (Pr) for maior que 4, cujos parâmetros são definidos na Figura 7:

$$\text{Profundeza}(Pr) = \frac{\text{Profundidade}(l_2)}{\text{Menor dim.da secção transversal}(l_1 \text{ ou } h)} \quad (1)$$

Com o aumento da profundidade (Pr), há uma diminuição das sucções na fachada do sotavento. Já com relação as sobrepressões, os efeitos do crescimento da profundidade são desprezíveis.

A figura 7 ilustra as forças tangenciais em edificações profundas, assim como a região de recolamento.

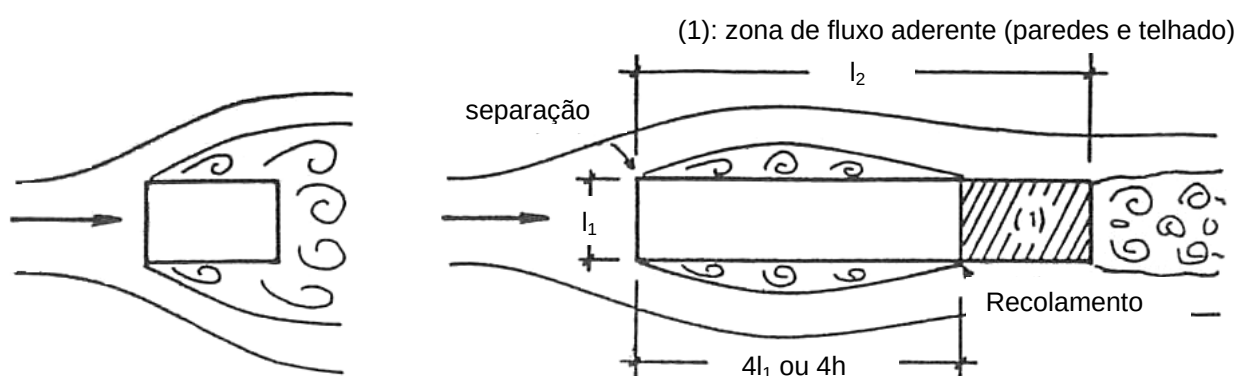


Figura 7 – Forças Tangenciais em Pavilhões Profundos. Fonte: Pitta (1991)

3.4. Pressões Flutuantes

O desenvolvimento de transdutores de pressão pequenos e de sensibilidade adequada possibilitou um grande número de pesquisas que incluíam, além de valores médios, a medida e análise de flutuações de pressão. Essas flutuações de pressão originam-se basicamente, em:

- Flutuações de velocidade nos turbilhões que se formam após a separação do fluxo da superfície do sólido, e que constituem um prolongamento da camada limite, local onde a camada limite descarrega sua vorticidade;
- Flutuação de velocidade na esteira, situada a sotavento do sólido, local onde há uma grande perda de energia;
- Flutuação de velocidade (turbulência) do fluxo incidente, com as conseqüentes flutuações de pressão, principalmente nas superfícies diretamente expostas ao vento.

As pressões originadas por flutuações rápidas só apresentam boa organização sobre superfícies muito pequenas da edificação. Em superfícies maiores, o efeito total é pequeno, pois essas pressões variáveis aumentam as ações em umas partes, mas diminuem em outras.

Inicialmente no estudo de flutuações, considerava-se somente a média aritmética dos picos medidos independentemente em todas as tomadas na zona em estudo. As ações efetivas dessas flutuações acabaram sendo superestimadas por essas médias devido à pequena correlação dos picos individuais de alta frequência.

Nos últimos anos, com o desenvolvimento da técnica da medida pneumática, em que todas as tomadas de pressão de uma certa região são interligadas por conectores múltiplos, possibilitou resultados mais corretos.

3.5. Ventos Naturais

Segundo Pitta (2001), vento é o movimento das massas de ar causadas por condições de pressão e de temperatura na atmosfera. Sua causa básica é o aquecimento não uniforme da atmosfera, provocado principalmente pelos raios ultravioletas emitidos pelo sol que aquecem a superfície da Terra, emitindo os raios infravermelhos que aquecem a atmosfera. A diferença entre as superfícies, a evaporação da água, sua precipitação e a rotação da Terra produzem massa de ar que originam o vento.

Frente Fria é o deslocamento de massa de ar fria sobre massa de ar quente provocando instabilidades associadas a chuvas intensas e ocorrência de fortes ventos, podendo atingir velocidades da ordem de 100 km/h. **Frente Quente** é o deslocamento de massa de ar quente sobre massa de ar fria, que normalmente é acompanhada de chuvas, porém com ventos de velocidades bem menores. Já a **tempestade tropical** está associada a uma grande nuvem convectiva que se desenvolve atingindo grandes dimensões.

A tabela de Beaufort, utilizada muitas vezes para se estimar a velocidade do vento, classifica o vento de acordo com seus efeitos produzidos.

Tabela 1 – Escala Beaufort: Velocidade do Vento e seus Efeitos. Fonte: Pitta (2001).

Grau	Velocidade do Vento		Descrição do vento	Efeitos devido ao Vento
	Intervalo (em m/s)	Média aprox. (em km/h)		
0	0,0-0,5	1	calmaria	
1	0,5-1,7	4	aura, sopro	A fumaça sobre praticamente na vertical.
2	1,7-3,3	8	brisa leve	Sente-se o vento nas faces
3	3,3-5,2	15	brisa fraca	Movem-se as folhas das árvores
4	5,2-7,4	20	brisa moderada	Movem-se pequenos ramos. O vento estende as bandeiras.
5	7,4-9,8	30	brisa vida	Movem-se ramos maiores.
6	9,8-12,4	40	brisa forte	Movem-se arbustos.
7	12,4-15,2	50	ventania fraca	Flexionam-se galhos fortes. O vento é ouvido em edifícios.
8	15,2-18,2	60	ventania moderada	Difícil caminhar. Galhos quebram-se, o tronco das árvores oscila.
9	18,2-21,5	70	ventania	Objetos leves são deslocados, partem-se arbustos e galhos grossos, avarias em chaminés.
10	21,5-25,5	80	ventania forte	Árvores são arrancadas, quebram-se os postes telegráficos.
11	25,5-29	95	ventania destrutiva	Avarias severas.
12	29 e mais	105	furacões	Avarias desastrosas, calamidades.

3.5.1. Principais Características

Acidentes geográficos tais como desertos, pradarias e outros, que ocorrem em certas regiões, possuem características típicas.

Para o planejamento das cidades e bairros em certas regiões, é de grande interesse que se conheça a velocidade média, direção e sentido do vento.

As condições topográficas e a altura em relação ao terreno influem na velocidade do vento, até uma altura de 250 a 600 metros, onde é atingida a velocidade gradiente. A essa altura, denomina-se camada-limite da atmosfera. Até

essa altura, a topografia do terreno e os obstáculos naturais (rugosidade superficial) influenciam na velocidade do vento.

Para determinar a velocidade média do vento (v_z), Davenport (apud Pitta, 2001) sugere uma lei exponencial que se estende até a altura gradiente (z_g), onde ocorre a velocidade gradiente ($v_g = 160 \text{ km/h}$):

$$V_z = V_g \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (2)$$

z_g e α dependem da rugosidade do terreno e estão indicadas na Figura 8 para três superfícies típicas:

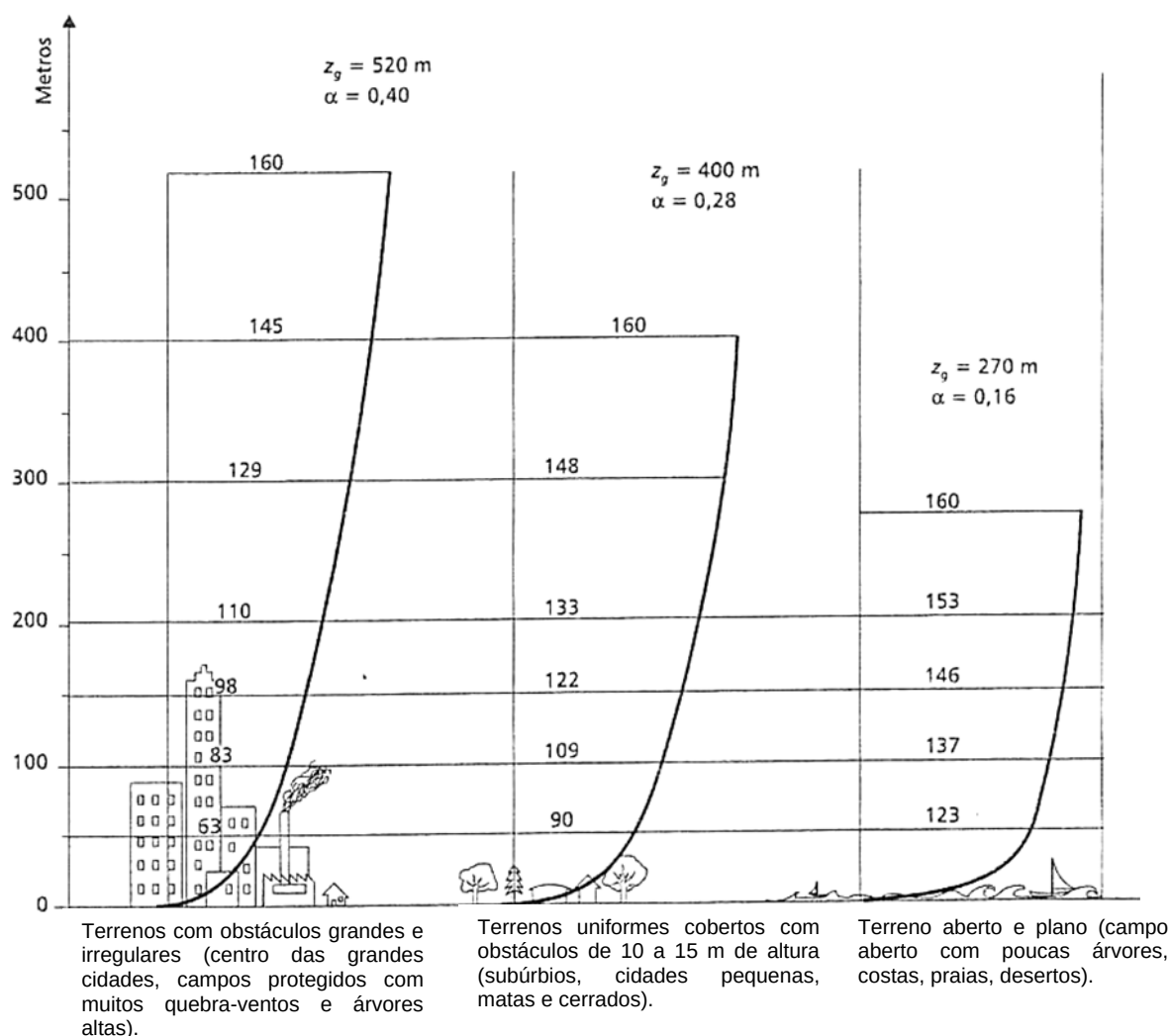


Figura 8 – Perfis de Velocidade Média do Vento (Km/h) de Acordo com a Rugosidade do Terreno, Segundo Davenport (apud Pitta, 2001)

As características do vento de maior interesse para a engenharia de estruturas são a velocidade média e as flutuações do vento (rajadas). Essas rajadas

geralmente são de curta duração e apresentam valores superiores à média. Quanto mais veloz a rajada, menor sua duração. A duração da rajada deve ser suficiente para abranger toda a edificação. Um dos critérios é baseado na dimensão dos turbilhões.

Sendo a velocidade média do vento igual à velocidade de deslocamento do turbilhão(v), o tempo (t) necessário para esse passar pela edificação é:

$$t = \frac{C}{v} = 6a9\left(\frac{H}{v}\right) \quad (3)$$

onde C é o comprimento do turbilhão e H é a altura da edificação.

3.5.2. Simulação do Vento Natural

A comparação de uma edificação real e seu modelo simulado em um túnel de vento é um dos melhores meios para simular corretamente as principais características do vento.

Blessmann (apud Jensen e Franck, 1991) simularam diversos ventos naturais e compararam os resultados com medidas efetuadas em uma casa construída em campo aberto especialmente para seu estudo. No túnel de vento diversos ventos foram simulados através de rugosidades adequadas colocadas no piso. O parâmetro de referência utilizado por eles foi a relação h/z_0 entre a altura das paredes do modelo e o comprimento de rugosidade correspondente a cada vento simulado. Uma boa concordância entre os resultados foi encontrada para a relação de $h/z_0=180$ quando comparados com o vento natural.

Segundo Blessmann (1991), as ações do vento diminuem à medida que a rugosidade do terreno aumenta. A turbulência aumenta com a rugosidade, mas a velocidade média diminui, de tal modo que as pressões em terrenos mais rugosos são menores.

3.6. Velocidade do Vento

A velocidade do vento é medida por anemômetros ou anemógrafos com auxílio de projeções estatísticas com um certo grau de confiabilidade.

É necessário que se estabeleça uma base para condição de leitura para o tratamento de dados de diferentes postos de leitura, pois sabe-se que a velocidade do vento varia com a altura e as condições locais do terreno.

As seguintes condições de leitura em aparelhos padronizados são estabelecidas:

- Localização dos aparelhos em terrenos a 10 metros de altura;
- Inexistência de obstáculos que possam alterar o fluxo de ar no local da medida;
- Leitura da velocidade média sobre três ângulos (velocidade instantânea).

A maioria dos postos meteorológicos se encontra nos aeroportos, pois esses necessitam de informações de intensidade, direção e sentido do vento para sua operação.

• Velocidade Característica do Vento

A velocidade característica do vento é obtida através da velocidade básica do vento onde se leva em consideração: a topografia local de determinada região, altura e dimensões em planta, rugosidade, condições específicas de vida útil, importância da edificação e conseqüências que sua ruína pode causar, pois dificilmente se encontrará uma edificação que permita aplicar diretamente a velocidade básica do vento.

Segundo a NBR 6123 (ABNT,1988), a velocidade característica do vento é calculada pela seguinte expressão:

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (4)$$

onde:

$V_o \Rightarrow$ velocidade básica do vento no local;

$S_1 \Rightarrow$ fator topográfico que considera as variações de relevo de terreno no entorno da edificação.

$S_2 \Rightarrow$ considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte dela;

$S_3 \Rightarrow$ fator estatístico que considera o grau de segurança e a vida útil da estrutura.

Em anexo, segue como calcular os valores S_1 , S_2 e S_3 conforme NBR 6123 (ABNT, 1988).

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS

Na presente seção será abordada de maneira resumida a fundamentação teórica para o entendimento dos efeitos do vento na edificação como um fluido. Para um melhor aprofundamento no assunto é indicado fazer uma pesquisa mais detalhada do assunto em um bom livro de mecânica dos fluidos.

Até uma velocidade de 300km/h, o vento pode ser considerado como um fluido incompressível.

Quando um objeto está mergulhado em um fluido ideal (não-viscoso e incompressível), as ações nesse objeto se dão por intermédio de forças perpendiculares à superfície, e se estiverem sob as mesmas condições manométricas, apresentarão a mesma pressão normal na parede do objeto.

4.1. Teorema da conservação de massa

Num certo intervalo de tempo, a massa de um fluido que entra em um volume é igual à massa que sai, mais a variação da massa contida no elemento.

Quando as partículas de um fluido têm a mesma velocidade num mesmo ponto em uma mesma trajetória e este fluido não depende do tempo é dito que o fluxo é permanente (figura 9).

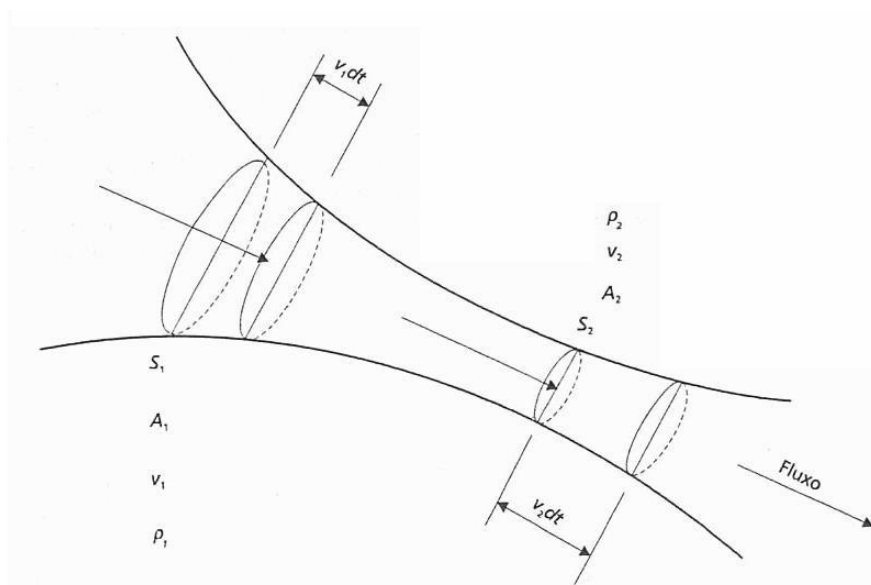


Figura 9 – Contorno de um Tubo de Corrente de um Fluido. Fonte: Pitta (1991)

onde:

$A \Rightarrow$ área de uma superfície plana;

$v \Rightarrow$ velocidade média do fluido;

$\rho \Rightarrow$ massa específica do fluido.

Considerando-se o volume limitado pelo tubo de corrente da Figura 9, e pelas seções S_1 e S_2 em um regime permanente com intervalo de tempo dt , tem-se:

$$\text{Massa de fluido que entra} \Rightarrow \rho_1(A_1 v_1 dt_1) \quad (6)$$

$$\text{Massa do fluido que sai} \Rightarrow \rho_2(A_2 v_2 dt_2) \quad (7)$$

$$\text{Em regime: } \rho_1(A_1 v_1 dt_1) = \rho_2(A_2 v_2 dt_2) \quad (8)$$

Considerando o fluido incompressível $\Rightarrow \rho_1 = \rho_2 = \rho$, então:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (9)$$

4.2. Teorema de Bernoulli

O Teorema de Bernoulli, que também é conhecido como Teorema da conservação de energia, pode ser expresso pela equação 10, quando se considera o fluido em regime de escoamento permanente sem viscosidade e incompressível.

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante} \quad (10)$$

onde:

$p \Rightarrow$ pressão estática;

$\rho \Rightarrow$ massa específica do fluido;

$g \Rightarrow$ aceleração da gravidade;

$z \Rightarrow$ cota de referência;

$v \Rightarrow$ velocidade do fluido.

Desprezando-se o termo ρgz em relação aos demais, tem-se:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \quad (11)$$

4.3. Pressão Estática

A pressão estática é definida como a força normal aplicada a uma área, quando o fluido está em repouso, ou seja:

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dF_n}{dA} \quad (12)$$

onde:

dF_n é a força normal exercida na área dA .

4.4. Pressão Total

A medida de pressão total, normalmente é realizada no ponto de estagnação (ponto onde a velocidade é nula), onde a pressão dinâmica é igual a zero restando apenas pressão estática.

Considerando-se P_k e v_k , respectivamente, a pressão e a velocidade em um ponto de fluxo a barlavento de um objeto não afetado pelo mesmo, e P_e e v_e a pressão e a velocidade em um ponto **e** do objeto, e utilizando-se a equação de Bernoulli, tem-se:

$$P_k + \frac{1}{2}\rho v_k^2 = P_e + \frac{1}{2}\rho v_e^2 \quad (13)$$

Considerando-se que **e** seja um ponto de estagnação ($v_e=0$), tem-se:

$$P_k + \frac{1}{2}\rho v_k^2 = P_e \quad (14)$$

Essa técnica de medida de pressão total foi realizada em 1732 por Henri Pitot, utilizando-se um pequeno tubo de vidro com uma curva em ângulo reto e a frente voltada para barlavento.

4.5. Pressão de Obstrução

A diferença das pressões estáticas citadas na equação 14 é conhecida como pressão de obstrução (q).

$$P_e - P_k = \frac{1}{2} \rho v_k^2 = q \quad (15)$$

Em local não perturbado pelo obstáculo, a pressão dinâmica do fluxo é igual à pressão de obstrução.

$$q = \frac{1}{2} \rho v_k^2 = \frac{1}{2} 1,225 v_k^2 = 0,613 v_k^2 \quad (16)$$

O valor 0,613 vale para condições normais de pressão e temperatura (1atm e 15°C).

5. EFEITO ESTÁTICO DEVIDO AO VENTO

Toda ação devida ao vento é dinâmica, pois sua velocidade varia com o tempo, podendo dividi-la por razões práticas em uma componente constante e uma de flutuação. Quando o período médio de separação da componente de flutuação é maior ou igual a cem vezes o período de vibração da estrutura, pode-se considerar o efeito do vento como sendo estático, Pitta (2001).

5.1. Coeficientes de Pressão

Sendo um objeto mergulhado em um fluido em movimento uniforme (Figura 10). Em alguns locais do objeto, onde as linhas de fluxo agem perpendicularmente à superfície, as linhas de fluxo se estagnam. Nesses pontos, a pressão efetiva é a já conhecida pressão de obstrução.

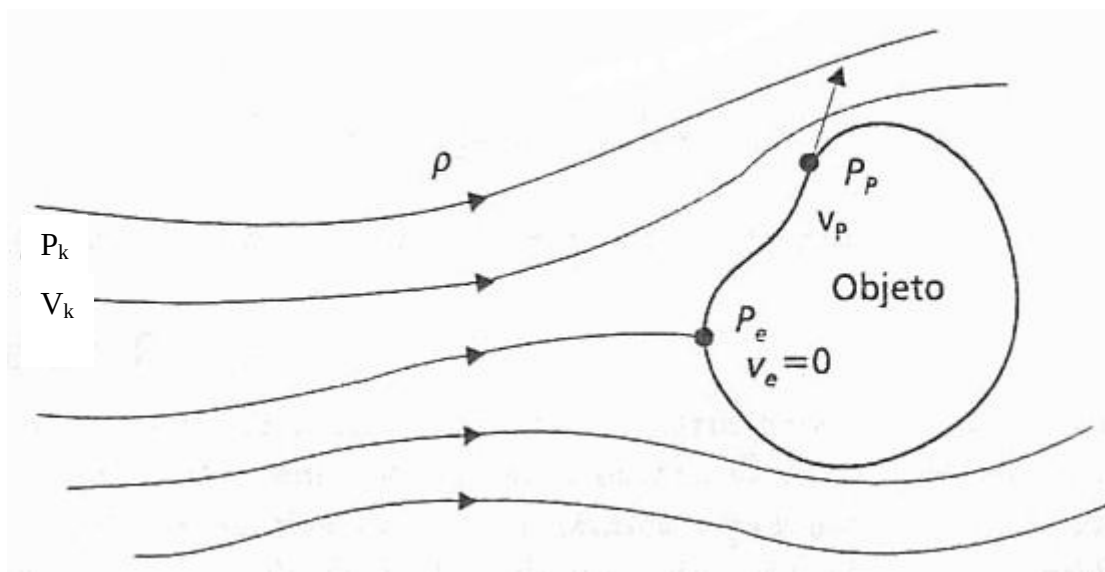


Figura 10 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto. Fonte: Pitta (1991)

$$P_k + \frac{1}{2} \rho V_k^2 = P_p + \frac{1}{2} \rho v_p^2 \quad (17)$$

No ponto p, a pressão efetiva é dada por:

$$\Delta P_p = P_p - P_k = \frac{1}{2} \rho (v_k^2 - v_p^2) \Rightarrow \Delta P_p = \frac{1}{2} \rho v_k^2 \left(1 - \frac{v_p^2}{v_k^2}\right) \quad (18)$$

Substituindo na equação 15:

$$\Delta P_p = q \left(1 - \frac{v_p^2}{v_k^2} \right) \quad (19)$$

$$\therefore \Delta P_p = c_p q \quad (20)$$

onde:

$$c_p = \left(1 - \frac{v_p^2}{v_k^2} \right) \quad (21)$$

Quando $c_p > 0$ ocorre sobrepressão, e quando $c_p < 0$ ocorre sucção. O valor máximo que pode ocorrer de sobrepressão em uma estrutura é igual ao valor de obstrução, ou seja, de $c_p = 1$. Já no caso das sucções, em certas regiões ela pode ser muito elevada chegando a atingir de 6 a 8 vezes a pressão de obstrução.

Quando o objeto não for totalmente fechado, à semelhança de uma edificação, qualquer que seja a posição de abertura, na superfície que compõe esse objeto ocorrerá tanto pressão externa quanto pressão interna, como mostra a Figura 11.

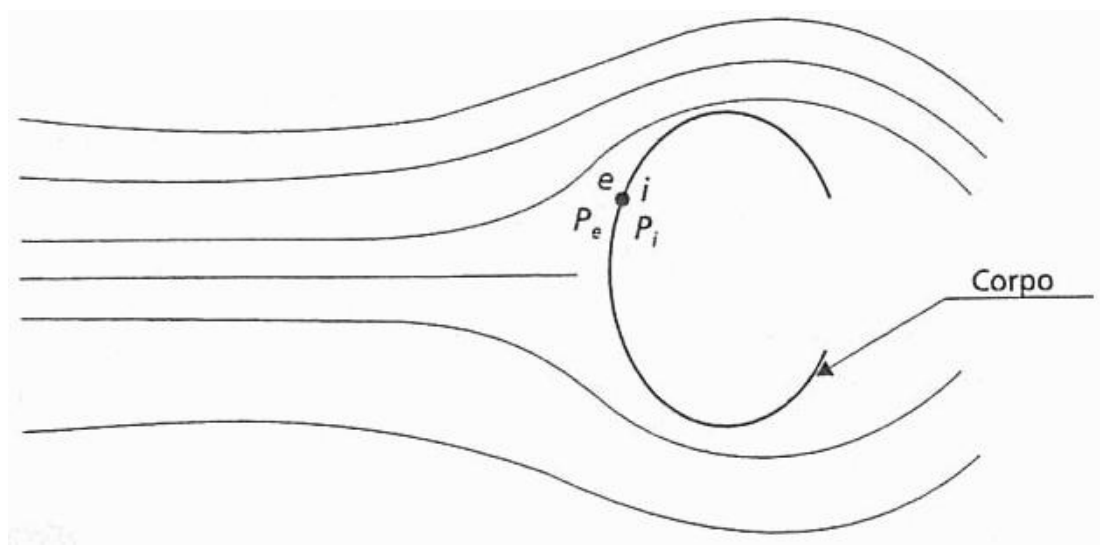


Figura 11 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto não Maciço com Abertura. Fonte: Pitta (1991)

As expressões a seguir correspondem ao coeficiente de pressão tanto na face externa quanto na face interna em um ponto genérico p.

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad (22)$$

$$c_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q} \quad (23)$$

As forças do vento dependem da diferença de pressão que ocorre nas faces opostas das partes da edificação.

$$\Delta P = \Delta P_e - \Delta P_i \quad (24)$$

onde :

$\Delta P_e \Rightarrow$ Pressão efetiva externa;

$\Delta P_i \Rightarrow$ Pressão efetiva interna.

O sinal de subtração na equação acima, se deve ao fato de que uma sobrepressão externa tem a mesma direção e sentido de uma sucção interna.

Das equações 22, 23, 24, tem-se:

$$\Delta P = q(c_{pe} - c_{pi}) \quad (25)$$

5.2. Coeficientes de Forma

Os coeficientes de forma definidos apenas para superfícies planas são calculados semelhantemente aos coeficientes de pressão. A força do vento perpendicular a um elemento de área A é dada por:

$$F = F_e - F_i \quad (26)$$

sendo:

$F_e \Rightarrow$ força externa à edificação;

$F_i \Rightarrow$ força interna à edificação.

$$F = (c_e - c_i)qA \quad (27)$$

onde:

$$c_e = \frac{F_e}{qA} \text{ (coeficientes de forma externos)} \quad (28)$$

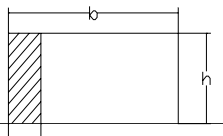
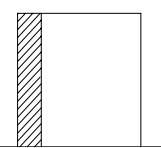
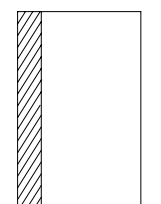
$$c_i = \frac{F_i}{qA} \text{ (coeficientes de forma internos)} \quad (29)$$

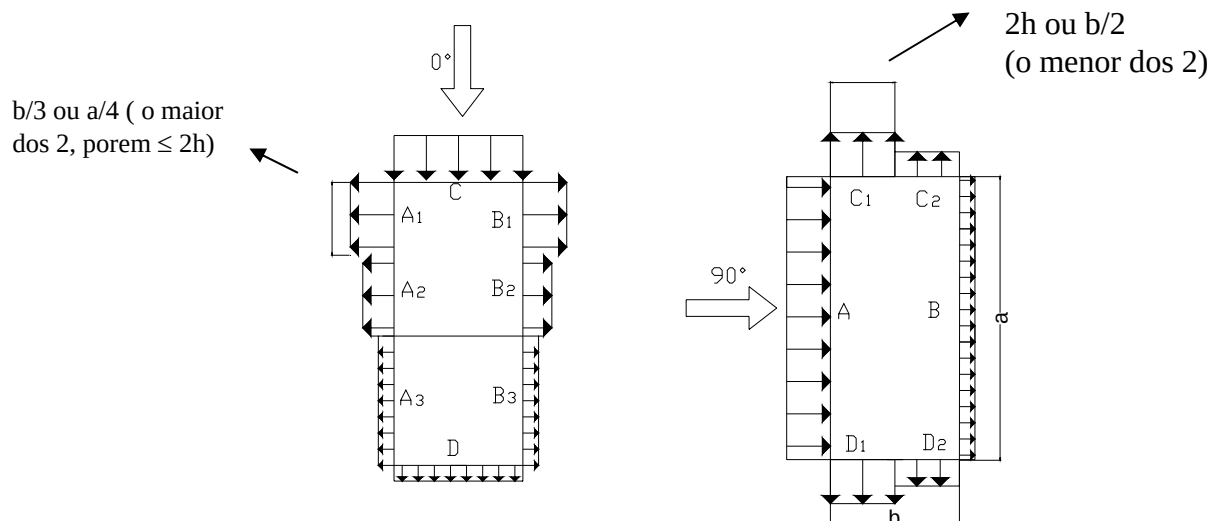
Valores positivos dos coeficientes de força externos e internos correspondem a sobrepressão e valores negativos correspondem à sucção.

A NBR 6123 (ABNT, 1988) fornece os coeficientes de pressão e de forma, externos, para diversos tipos de edificação que serão ilustrados na Tabela 2 e 3.

Sucções elevadas não aparecem simultaneamente em todas as partes da edificação. Essas aparecem geralmente em arestas de paredes e de telhados e dependem do ângulo de incidência do vento. Os coeficientes de pressão nessas regiões apresentam valores médios (c_{pe} médio) e são aplicados somente para o cálculo do dimensionamento, verificação e ancoragem de elementos de vedação e de estruturas secundárias. Nesses elementos, deve ser usado o fator S_2 correspondente a Classe A.

Tabela 2 – Coeficientes de Pressão e de Forma, Externos, para Paredes de Edificações de Planta Retangular. Fonte: NBR 6123:1988

Altura relativa		Valores de Ce para								Cpe médio 
		α= 0°				α = 90°				
		A1 e B1	A2 e B2	C	D	A	B	C1 e D1	C2 e D2	
 0,2b ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	0,7	-0,4	0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	0,7	-0,3	0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	0,7	-0,5	0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,9	-0,4	0,7	-0,3	0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1,0	-0,6	0,8	-0,6	0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-1,0	-0,5	0,8	-0,3	0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2



Notas:

Para a/b entre $3/2$ e 2 , interpolar linearmente;

Para vento a 0° , nas partes A_3 e B_3 o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:

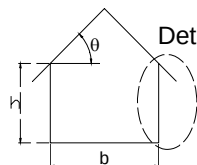
Para $a/b = 1$: mesmo valor das partes A_2 e B_2

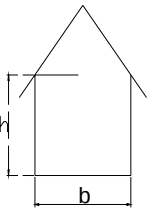
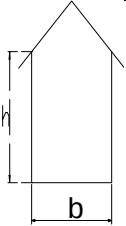
Para $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$

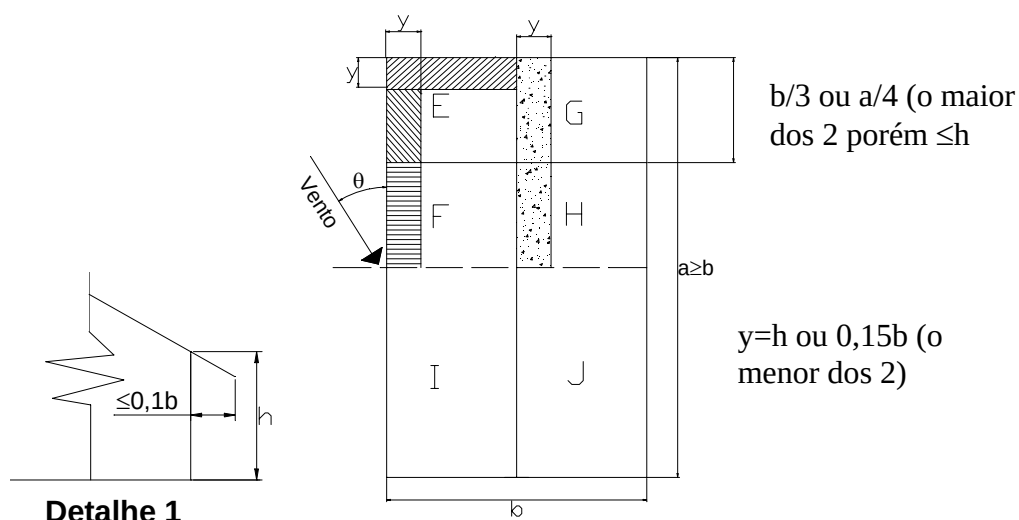
Para $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente

Para cada uma das duas incidências do vento (0° e 90°) o coeficiente de pressão médio externo p_e aplicada na parte de barlavento das paredes paralelas ao vento em uma distância igual a $0,2b$ ou h , considerando-se o menor desses dois valores.

Tabela 3 – Coeficientes de Pressão e de Forma, Externos, para Telhados com Duas Águas, Simétricos, em Edificações de Planta Retangular. Fonte: NBR 6123:1988

Altura relativa	teta	Valor de Ce para				Cpe médio			
		$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
 $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0	-1,2		-1,2
	30°	0,0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8	-1,1		
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6	-1,1			
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6	-1,1			

 $\frac{1}{2} \leq \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				
 $\frac{3}{2} \leq \frac{h}{b} \leq 6$	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7				
	60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7				



Notas:

O coeficiente de forma C_e na face inferior do beiral é igual ao da parede correspondente.

Nas zonas em torno de partes de edificações salientes ao telhado (chaminés, reservatórios, torres, etc) deve ser considerado um coeficiente de forma $C_e = 1,2$ até uma distância igual à metade da dimensão da diagonal da saliência vista em planta.

Nas coberturas de lanternins, C_{pe} médio = $-2,0$

Para vento a 0° , nas partes I e J o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:

$a/b = 1$: mesmo valor das partes F e H;

$a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$.

Para valores intermediários de a/b , interpolar linearmente.

5.3. Coeficientes de Força

A força global (F_g) do vento sobre uma edificação ou parte dela, é obtida pela soma vetorial das forças do vento que aí atuam.

O coeficiente de força global (C_g) é obtido dividindo-se essa força pela pressão dinâmica e por uma área A referente à edificação.

$$C_g = \frac{F_g}{qA} \quad (30)$$

Segundo Pitta (2001), a força global pode ser decomposta em direções preestabelecidas. Algumas dessas direções são notáveis e podem definir alguns coeficientes:

- **Coeficiente de arrasto:** quando a componente da força global tem a mesma direção do vento.

$$C_a = \frac{F_a}{qA} \quad (31)$$

- **Coeficiente de sustentação:** quando a componente global é perpendicular ao plano do horizonte.

$$C_s = \frac{F_s}{qA} \quad (32)$$

- **Coeficiente de força lateral:** quando a componente de força global é normal à direção do vento e está contida no plano do horizonte:

$$C_l = \frac{F_l}{qA} \quad (33)$$

- **Coefficiente de força horizontal:** quando a componente de força global está contida no plano do horizonte, ou seja, é a resultante das forças laterais e de arrasto.

$$C_h = \frac{F_h}{qA} \quad (34)$$

Cada um desses coeficientes pode ser especificado em relação a uma área particular, mas quando se deseja compará-los deve-se adotar a mesma área de referência.

5.4. Coeficientes de Torção

Um momento de torção M_t ocorre quando a ação da força global não intercepta o eixo de torção da edificação. O coeficiente de torção pode ser definido da seguinte forma:

$$C_t = \frac{M_t}{qAL} \quad (35)$$

onde:

L é uma dimensão linear de referência utilizada para tornar o coeficiente de torção adimensional.

5.5. Coeficientes de Pressão Interna

O coeficiente de pressão interna varia com a magnitude das aberturas e da localização dessas aberturas na edificação, em relação ao vento. Para sua determinação, é necessário que se considerem todas as aberturas da edificação, inclusive as frestas.

Quando as aberturas estão situadas a barlavento, a pressão interna será positiva. Se não houver forro ou esse for suportado pela estrutura do telhado, a sobrepressão interna se somará com a sucção externa, criando situação de maior risco de arrancamento da cobertura. Já quando as aberturas se situam a sotavento, ocorrerá uma sucção interna que ajudará na estabilidade da estrutura diminuindo a possibilidade de arrancamento da cobertura sob a ação do vento (Figura 12).

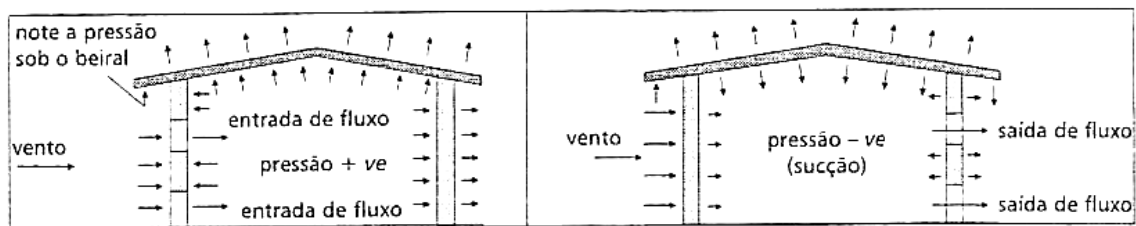


Figura 12 – Aberturas a Barlavento (a Esquerda) e a Sotavento (a Direita) em uma Edificação.

Fonte: Pitta (1991)

O **índice de permeabilidade** de uma superfície é definido como a relação entre a soma das áreas de abertura de uma superfície com a área total dessa, que deverá ser calculado com toda precisão possível.

Quando uma edificação é totalmente impermeável, a pressão no seu interior será invariável e independente da velocidade da corrente. Porém, essa condição de impermeabilidade não ocorre, pois as paredes e as coberturas de edificações permitem a passagem de ar. No entanto, se a edificação possuir permeabilidade compreendida entre 0,01% e 0,05% (edificação para moradia ou escritório), pode ser admitido que a pressão externa não é modificada pela mesma.

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988) são considerados impermeáveis os seguintes elementos de vedação:

- lajes e cortinas de concreto armado ou protendido;
- paredes de alvenaria, de pedra, de tijolos, de blocos de concreto ou afins, sem portas, janelas ou qualquer outra abertura.

Os demais elementos construtivos e de vedação são considerados permeáveis.

A NBR 6123 (ABNT, 1988) adota os seguintes valores para os coeficientes de pressão interna, em edificações com paredes internas permeáveis:

- a) Duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras faces impermeáveis:
 - vento perpendicular a uma face permeável $C_{pi} = +0,2$
 - vento perpendicular a uma face impermeável $C_{pi} = -0,3$
- b) Quatro faces igualmente permeáveis $C_{pi} = -0,3$ ou 0
(considerar o valor mais nocivo)
- c) Abertura dominante em uma face; as outras faces de igual permeabilidade:
 - abertura dominante na face de barlavento.

Proporção entre a área de todas as aberturas na face de barlavento e a área total das aberturas em todas as faces (paredes e coberturas) submetidas a sucções externas estão expressas na Tabela 4 retirada da NBR 6123(ABNT, 1988):

Tabela 4 – Coeficientes de Pressão Interna para Proporções de Área de Todas as Aberturas na Face de Barlavento e a Área Total das Aberturas

Proporção entre áreas	Coeficiente de pressão interna (C_{pi})
1	+0,1
1,1	+0,3
2	+0,5
3	+0,6
6 ou mais	+0,8

- abertura dominante na face de sotavento.

Adotar o valor do coeficiente de forma externo correspondente a essa face (Tabela 2)

- abertura dominante em uma face paralela ao vento.

- abertura dominante não situada em zona de alta sucção externa.

Adotar o valor do coeficiente de forma externo correspondente ao local da abertura nessa face (Tabela 5)

- abertura dominante situada em zona de alta sucção externa.

Proporção entre a área da abertura dominante (ou área de abertura situada nessa zona) e a área total das outras aberturas situadas em todas as faces submetidas a sucções externas está indicada na Tabela 5 retirada da NBR 6123(ABNT, 1988):

Tabela 5 – Coeficiente de Pressão Interna para Proporção entre a Área da Abertura Dominante e a Área Total das Outras Aberturas

Proporção entre áreas	Coeficiente de pressão interna (C_{pi})
0,25	- 0,4
0,50	- 0,5
0,75	- 0,6
1,0	- 0,7
1,5	- 0,8
3 ou mais	- 0,9

As zonas de alta sucção externa são as zonas hachuradas nas tabelas 2 e 3.

Quando uma edificação é considerada estanque e suas janelas fixas têm uma probabilidade desprezível de ser rompida por acidentes, considera-se $C_{pi} = - 0,2$ ou 0 (o mais nocivo dos dois).

Um maior entendimento sobre os coeficientes de pressão interna pode ser obtido através do anexo D da NBR 6123 (ABNT,1988).

6. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

A análise numérica foi efetuada através do software ANSYS 9.0, disponível no Departamento de Engenharia Civil da UNESP, Campos de Ilha Solteira, onde foram simulados diversos casos de edificações que serão descritos a seguir.

Os edifícios industriais a serem analisados terão dimensões em uma relação geométrica em planta de comprimento e de largura (a/b) iguais a 1.0, 1.5, 2.0 4.0 e relações geométricas em elevação com relação de altura e largura (h/b) iguais a 0.5, 1.0 1.5, 2.0, sendo a cobertura um telhado de duas águas, com uma inclinação de 15° . O ângulo de incidência do vento será de 0° (paralelo à cumeeira).

Em princípio, algumas simplificações foram feitas no modelo tais como: não utilização de beirais e platibandas e nem variação da inclinação do telhado.

A Figura 13 mostra os parâmetros geométricos da edificação e o ângulo de incidência do vento utilizado na simulação.

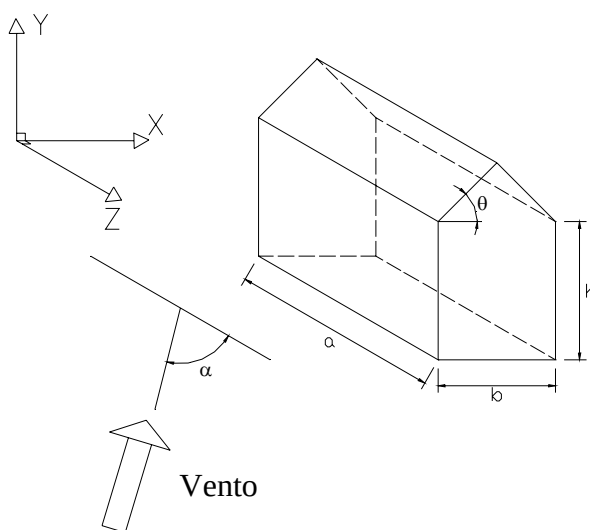


Figura 13 – Geometria da Edificação e ângulo de Incidência do Vento

onde:

$h \Rightarrow$ altura da edificação;

$b \Rightarrow$ largura da edificação;

$a \Rightarrow$ comprimento da edificação;

$\theta \Rightarrow$ inclinação do telhado;

$\alpha \Rightarrow$ ângulo de incidência do vento medido a partir do eixo z.

O vento simulado possui um perfil potencial de velocidade média com coeficientes $S_1=S_2=S_3=1$, que corresponde a terreno com rugosidade na categoria II, classe A da NBR 6123 (ABNT,1988). Assim sendo, a velocidade característica considerada para a simulação do vento é igual à velocidade básica de 40m/s.

O ANSYS FLOTRAN é uma opção simplificada do FLOTRAN CFD (Computational Fluid Dynamic) que possui o elemento Fluid141 para análise bidimensional e Fluid142 para análise tridimensional. No caso em estudo, utilizou-se o elemento de CFD, Fluid142, onde as velocidades são obtidas através do princípio de conservação de energia e a pressão através do princípio de conservação de massa. A temperatura, se necessário, é obtida através da lei de conservação de energia.

O Fluid142 pode ser utilizado para modelo transiente ou permanente que envolve regiões fluidas ou não fluidas. As equações de conservação para fluxo fluido viscoso e energia são resolvidas na região fluida, enquanto só a equação de energia é resolvida em uma região não fluida. A Figura 14 mostra a geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento. O elemento é definido por 8 nós e pela propriedade do material. Um elemento de forma tetraédrica pode ser formado, considerando-se o mesmo número de nó para os nós M, N, O e P e o mesmo número de nó para os nós K e L. Um elemento em forma de cunha ou pirâmide também pode ser usado como mostrado na Figura 14:

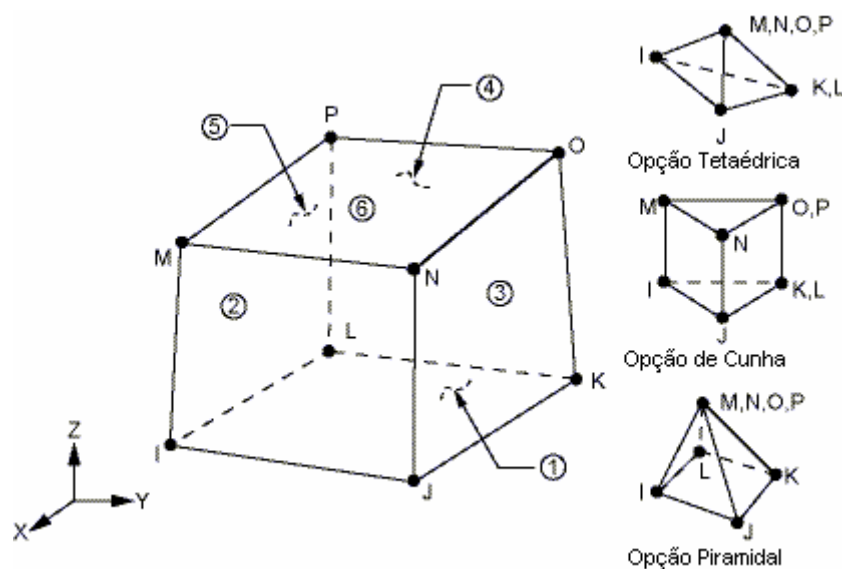


Figura 14 – Geometria do elemento. Fonte: Ansys 9.0

Na análise FLOTRAN podem ser consideradas algumas características de fluxo do fluido tais como:

- **Laminar ou turbulento**

Na análise laminar o campo de velocidade é ordenado e uniforme, enquanto que na análise turbulenta a velocidade é suficientemente alta e a viscosidade é suficientemente baixa para causar flutuações.

- **Adiabático ou térmico**

Nesse tipo de análise leva-se em consideração a variação ou não da temperatura.

- **Fluido compressível ou incompressível**

Fluxos laminares e turbulentos são considerados incompressíveis se a densidade é constante ou se o fluido gasta pouca energia para comprimir o fluxo.

- **Newtoniano ou não-Newtoniano**

Na análise Newtoniana leva-se em consideração a linearidade entre as tensões e deformações.

- **Permanente ou transiente**

Quando o fluxo é ou não constante ao longo do tempo.

- **Superfície livre**

No caso em estudo, considera-se o fluido onde a edificação está inserida, com as seguintes características: fluido turbulento, incompressível, isotérmico, com densidade de $1,23 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade de $1,79 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$.

A edificação estará envolvida em um “volume de controle”, que é definido de acordo com as dimensões da edificação. Esse volume deverá ser determinado de tal modo que suas dimensões não interfiram nas distribuições do fluxo de vento que pode provocar variações na pressão ao longo da edificação. Através de várias simulações, foi observado que para uma relação entre o volume de controle e a edificação maior que 3, os coeficientes de pressão na edificação não sofreram a influência do volume de controle. A discretização do volume de controle é feita pelo ANSYS através de malhas triangulares onde seu tamanho é definido de acordo com a necessidade de precisão dos resultados.

Apresenta-se na figura 15 a discretização do volume de controle para a situação tridimensional, utilizando-se o elemento Fluid142.

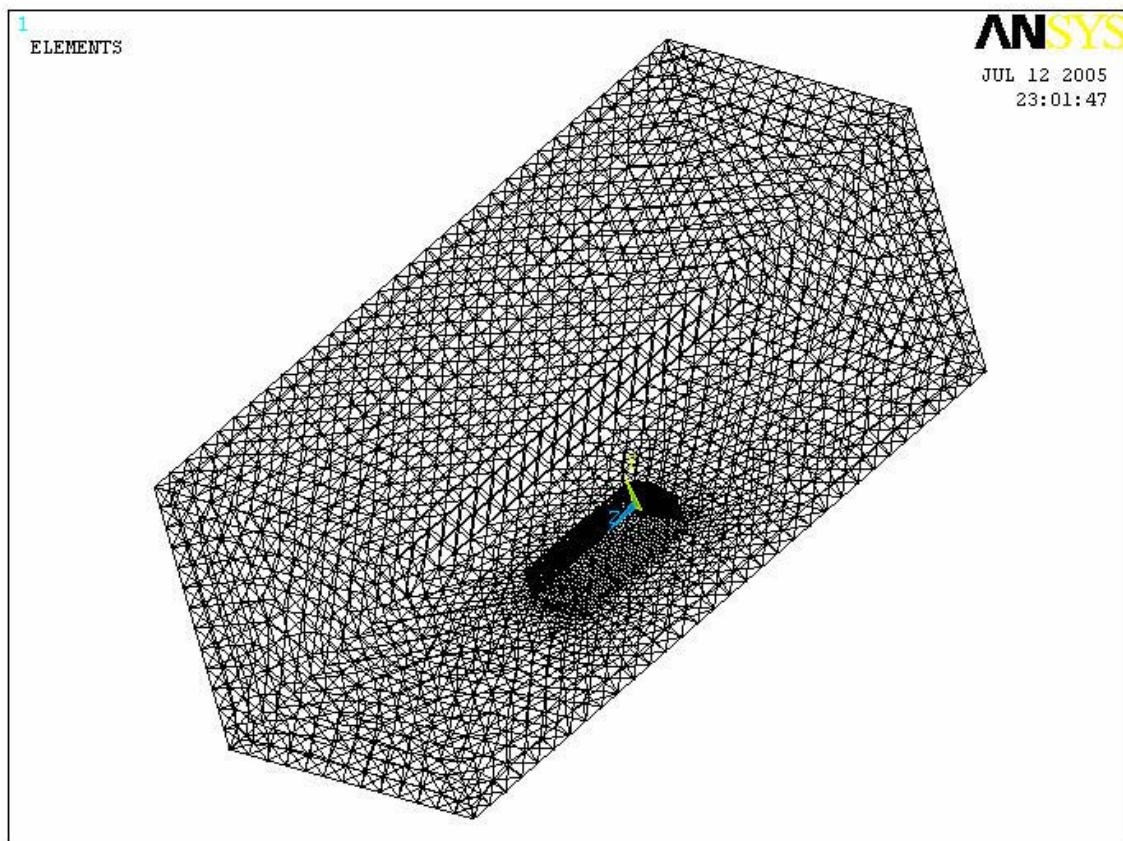


Figura 15 – Discretização do Volume de Controle

Foi utilizado o modelo de turbulência padrão $k-\epsilon$, pois esse tem um melhor tratamento de valores médios das características do fluido.

Para a simulação do modelo ao ar livre, foram aplicadas as seguintes condições de contorno no volume de controle:

- Na face à montante, na direção do vento a velocidade de entrada do vento V_x é igual a 40 m/s;
- Na face inferior e em todas as faces da edificação, $V_y=V_z=0$ (condição de não deslizamento);
- Nas duas faces laterais, na face superior e na face posterior, a pressão é igual a zero.

Apresenta-se na Figura 16 a representação das condições de contorno descritas acima, onde a seta indica a velocidade e o triângulo indica a pressão:

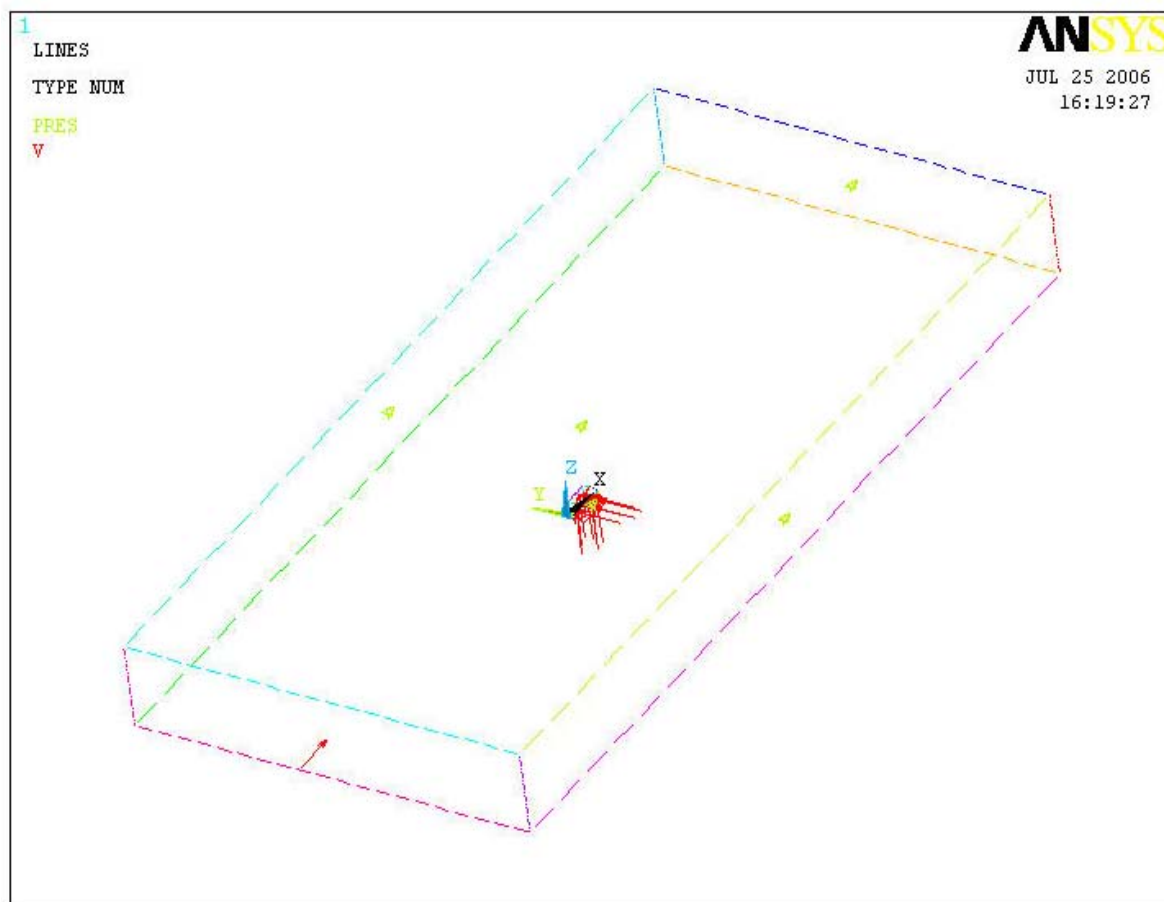


Figura 16 – Condições de Contorno para o volume de controle

Na análise da solução obtida pelo ANSYS, pode-se verificar a distribuição da velocidade nas três direções assim como os vórtices causados a jusante da edificação, a distribuição das pressões e dos coeficientes de pressão nas faces da edificação.

No anexo F é mostrado um tutorial de todos os passos executados para a elaboração do modelo e análise dos resultados.

7. ENSAIOS NUMÉRICOS

O volume de controle utilizado neste estudo foi definido com proporções tais que a distância entre cada face do volume e a face da edificação seja no mínimo três vezes o comprimento da edificação na mesma direção, visto que proporções menores influenciam nas distribuições das pressões.

Nas Figuras 17, 18 e 19 serão ilustrados os três planos de onde se podem obter os campos de velocidade, pressão e coeficiente de pressão.

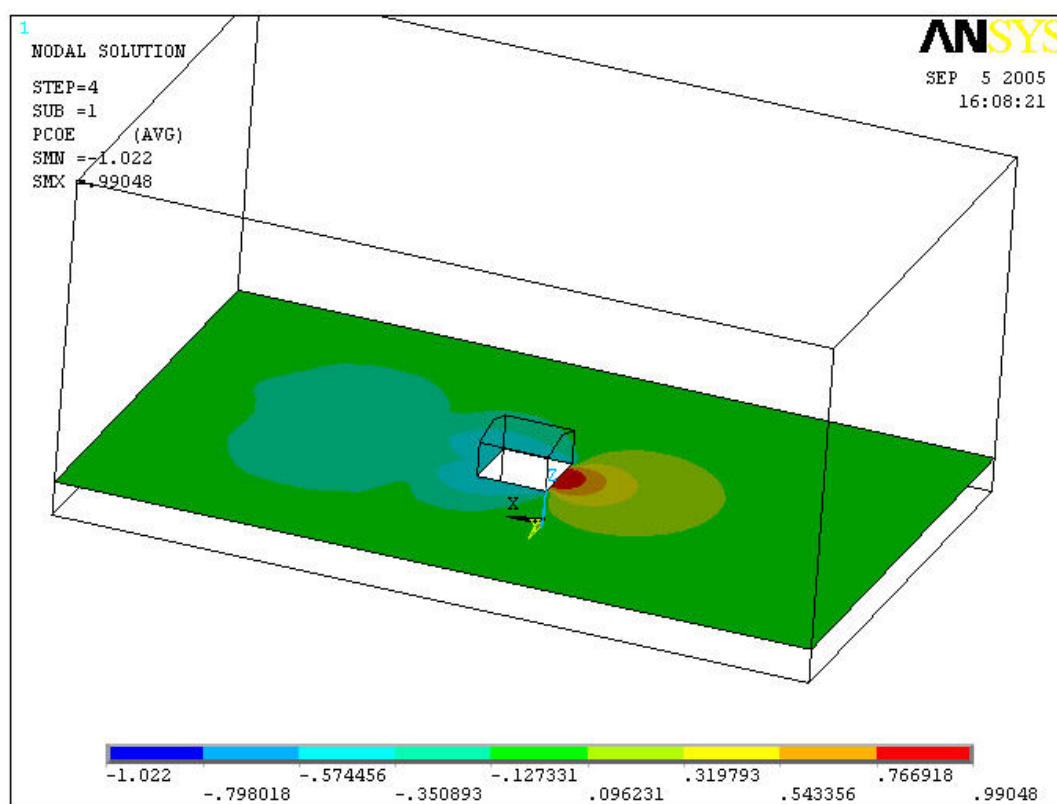


Figura 17 – Vista da distribuição dos coeficientes de pressão em um plano horizontal

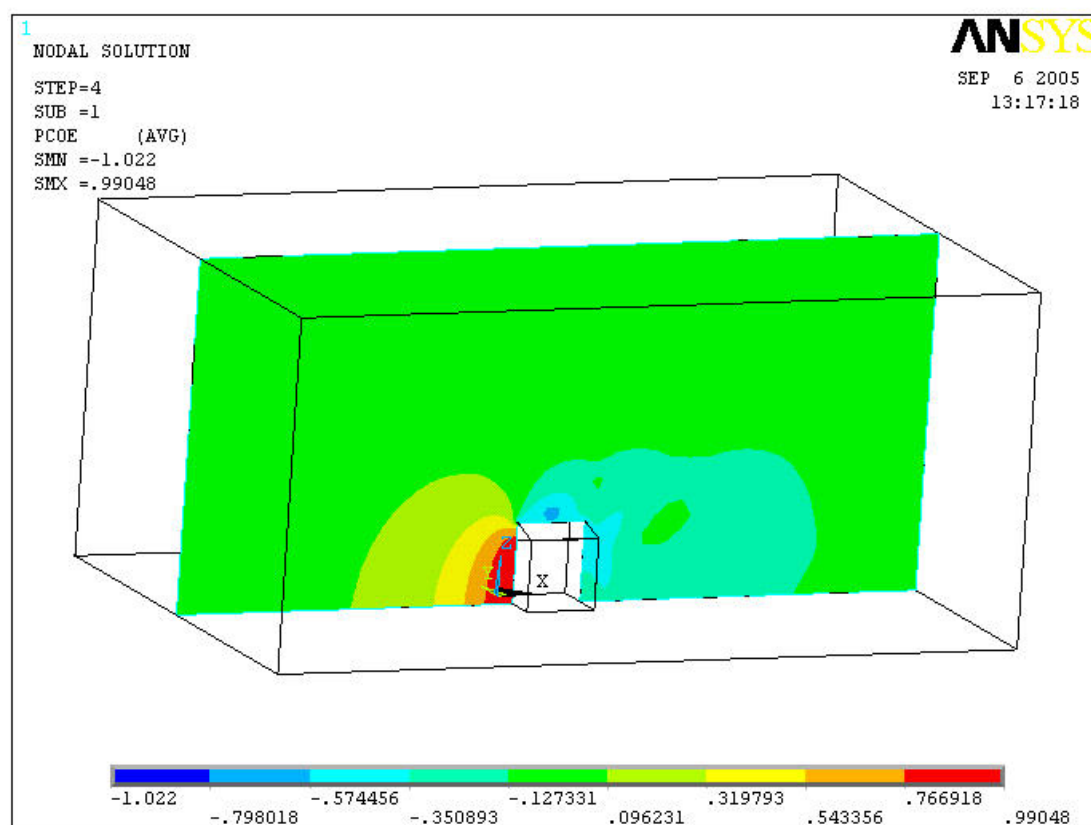


Figura 18 - Vista da distribuição dos coeficientes de pressão de um plano vertical longitudinal no eixo da cumeeira

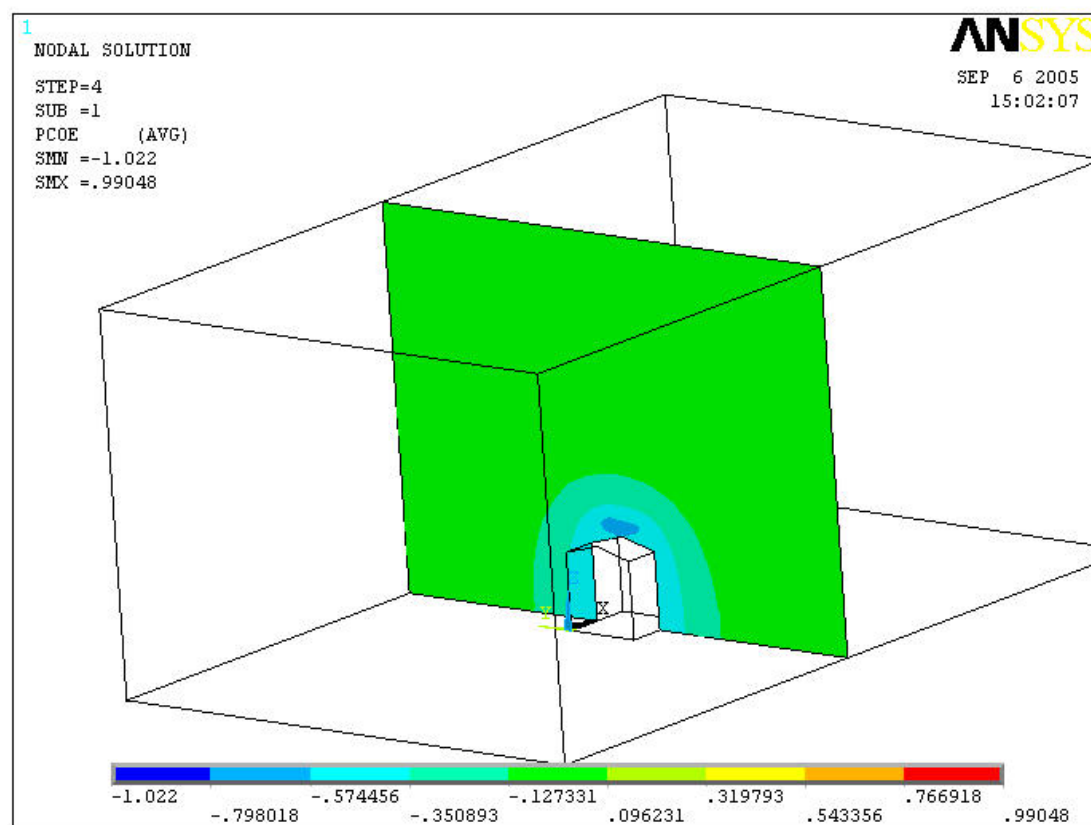


Figura 19 - Vista da distribuição dos coeficientes de pressão em um plano vertical perpendicular a cumeeira

As Figuras 20 a 27 ilustram o campo de velocidade e de pressão devido à ação do vento ao longo do volume de controle apenas para a relação comprimento, largura e altura de 1x1x1.

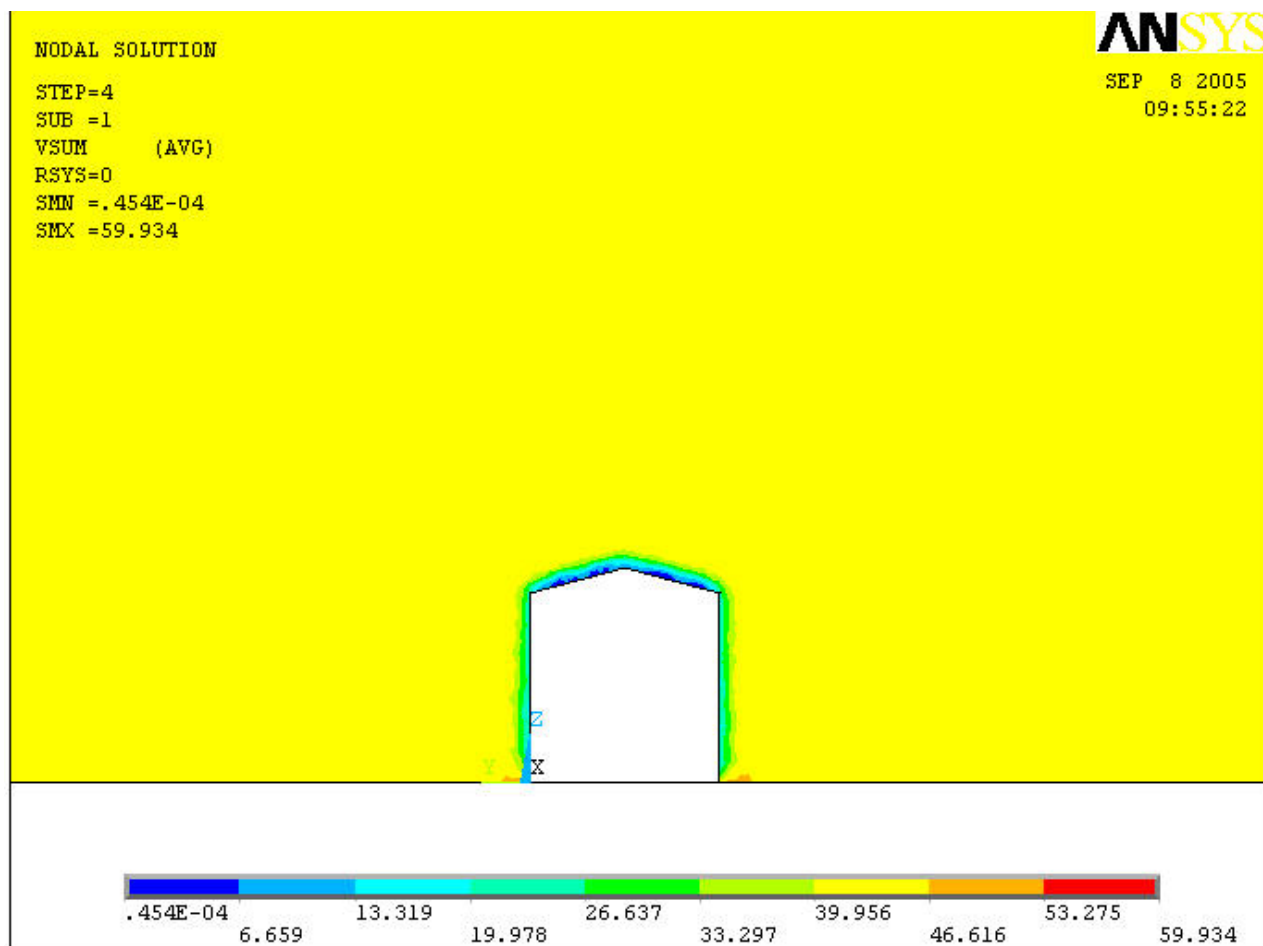


Figura 20 – Campo de velocidade em um plano perpendicular a cumeeira a 0,5 metros da face de barlavento em m/s

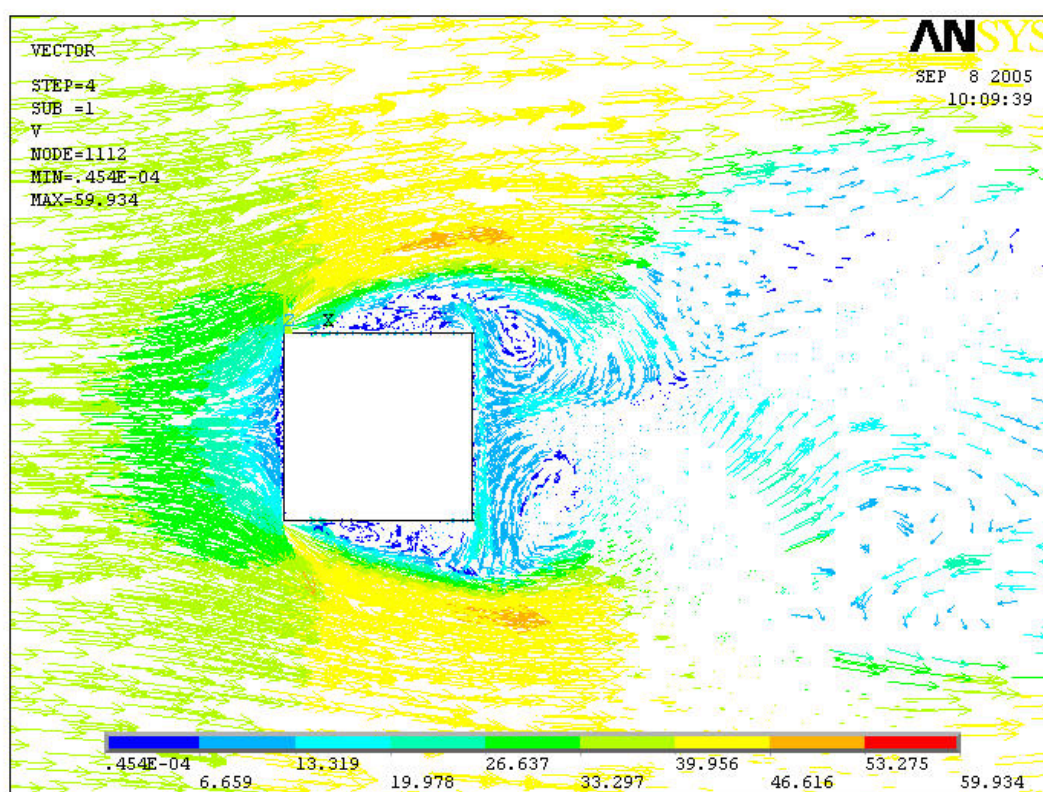


Figura 21 – Campo de vetor velocidade em um plano horizontal no meio da edificação, em m/s

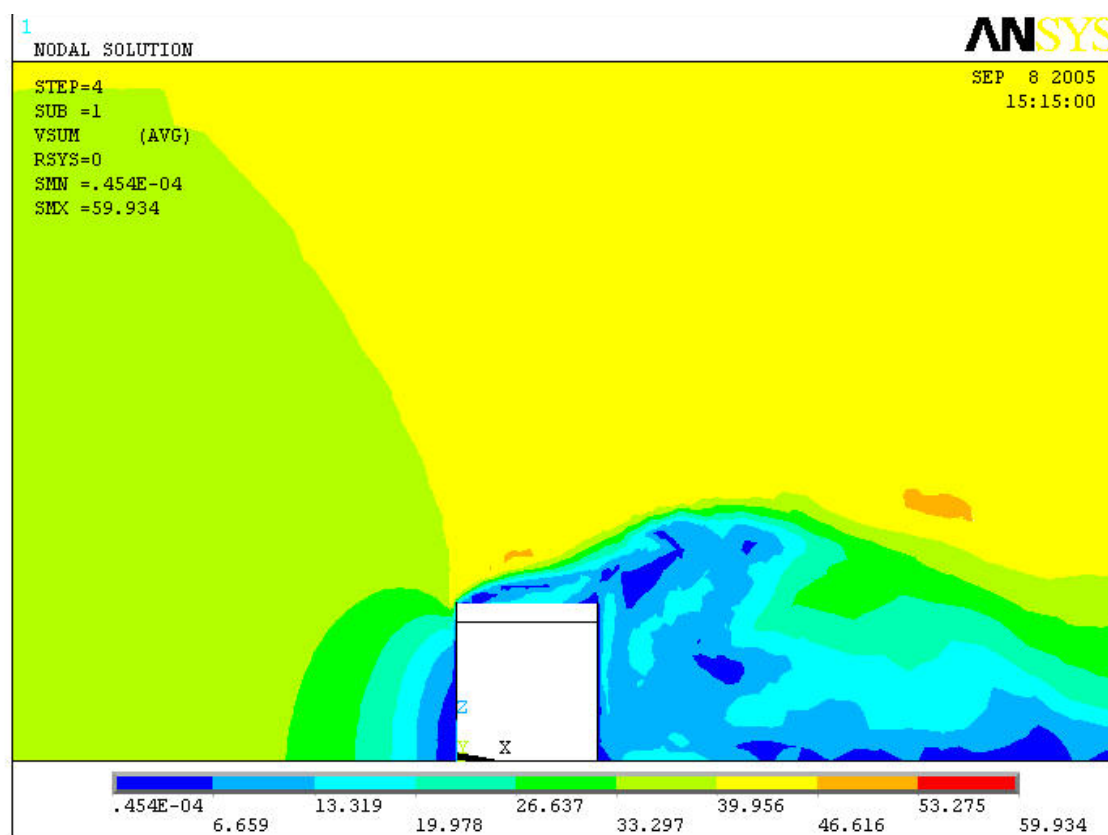


Figura 22 – Campo de velocidade em um plano longitudinal no eixo da cumeeira em m/s

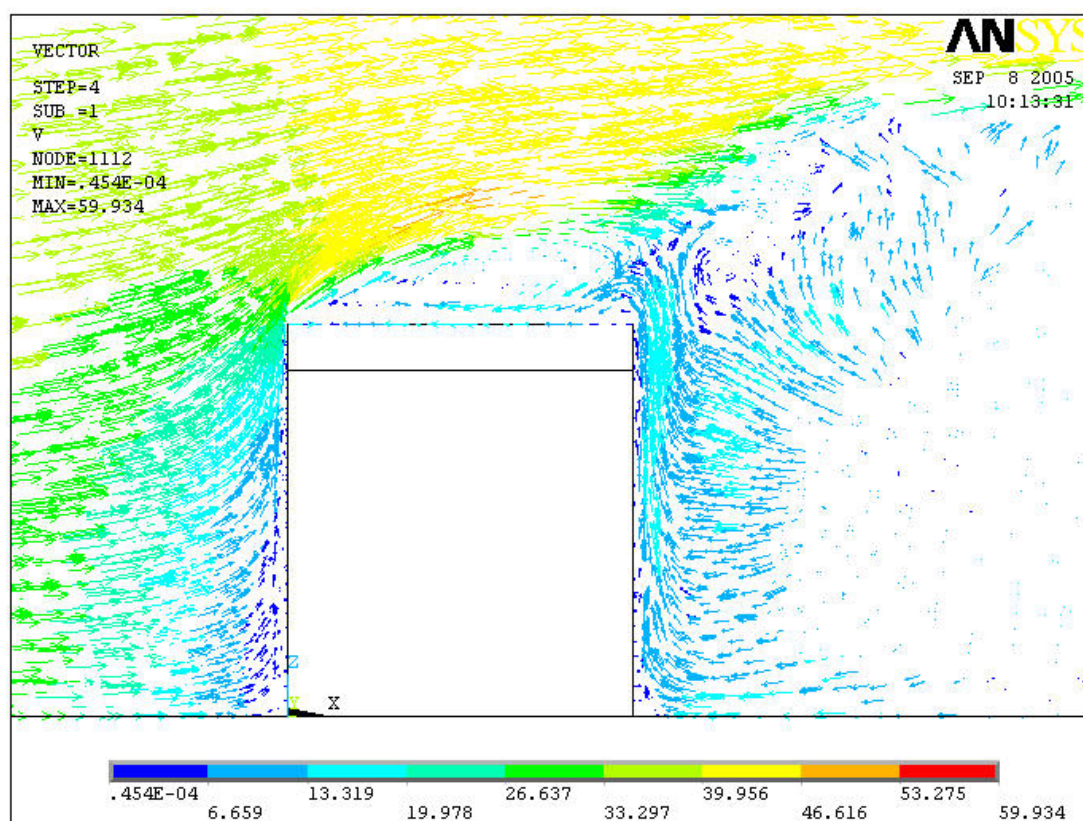


Figura 23 – Campo de vetor velocidade em um plano longitudinal no eixo da cumeeira em m/s

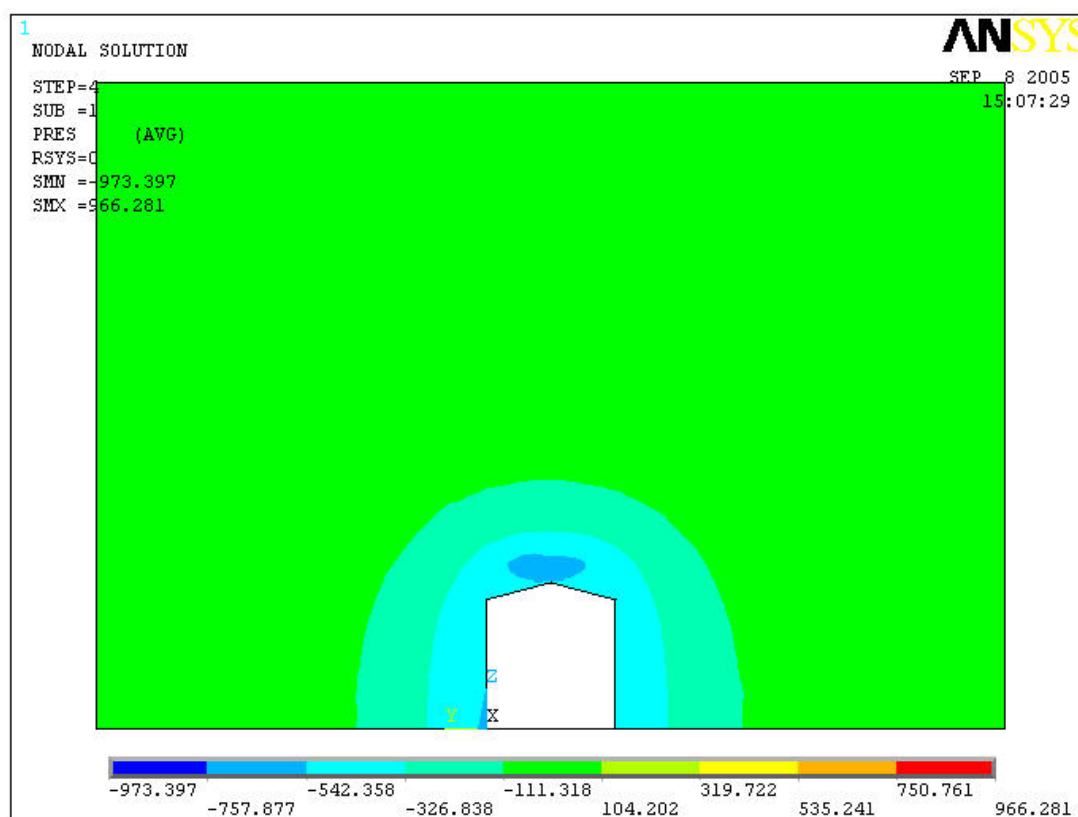


Figura 24 – Campo de pressão em um plano vertical perpendicular a cumeeira no meio da edificação

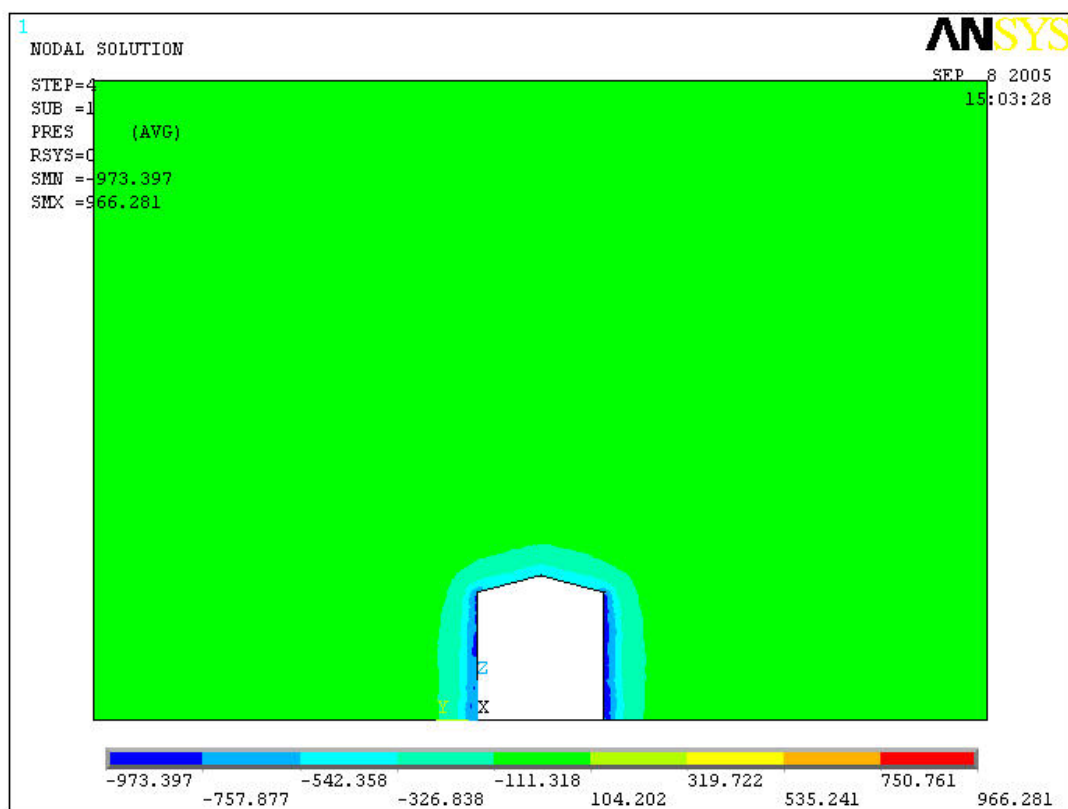


Figura 25 – Campo pressão em um plano vertical perpendicular a cumeeira a 0,5 metros da face de barlavento

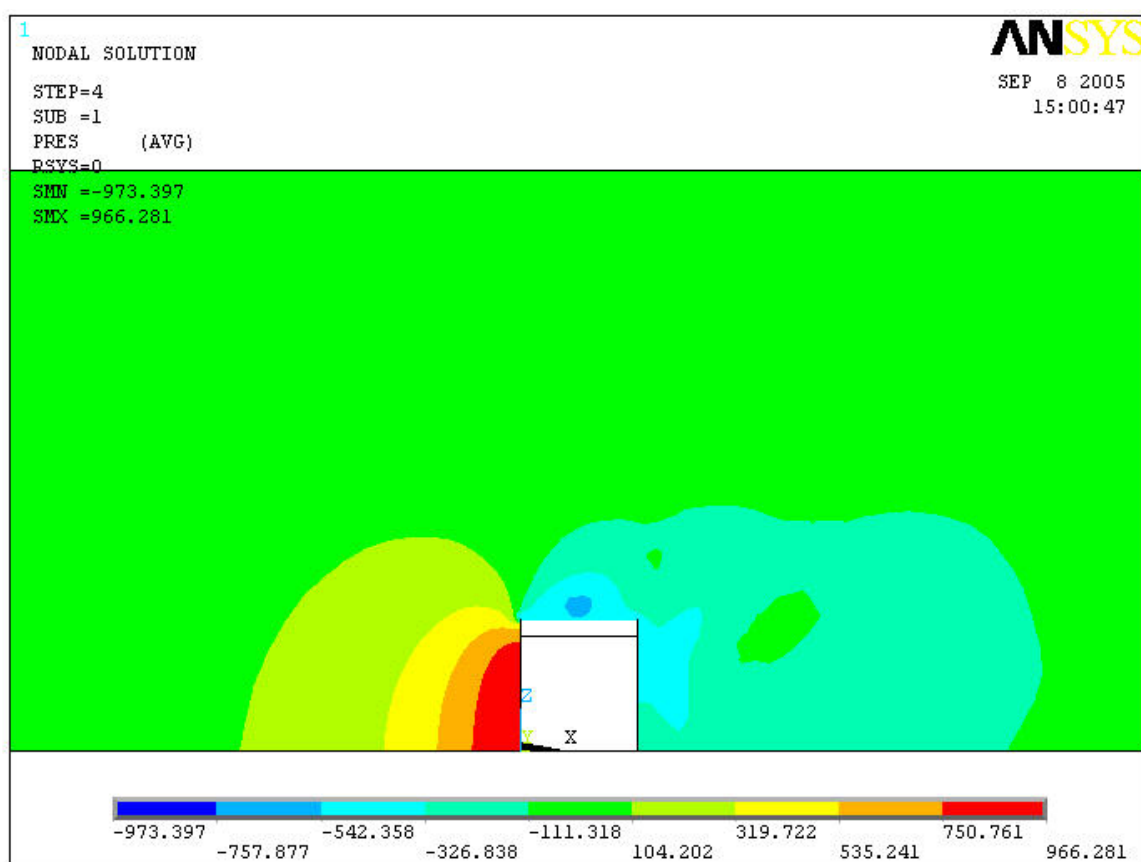


Figura 26 – Campo de pressão em um plano longitudinal no eixo da cumeeira

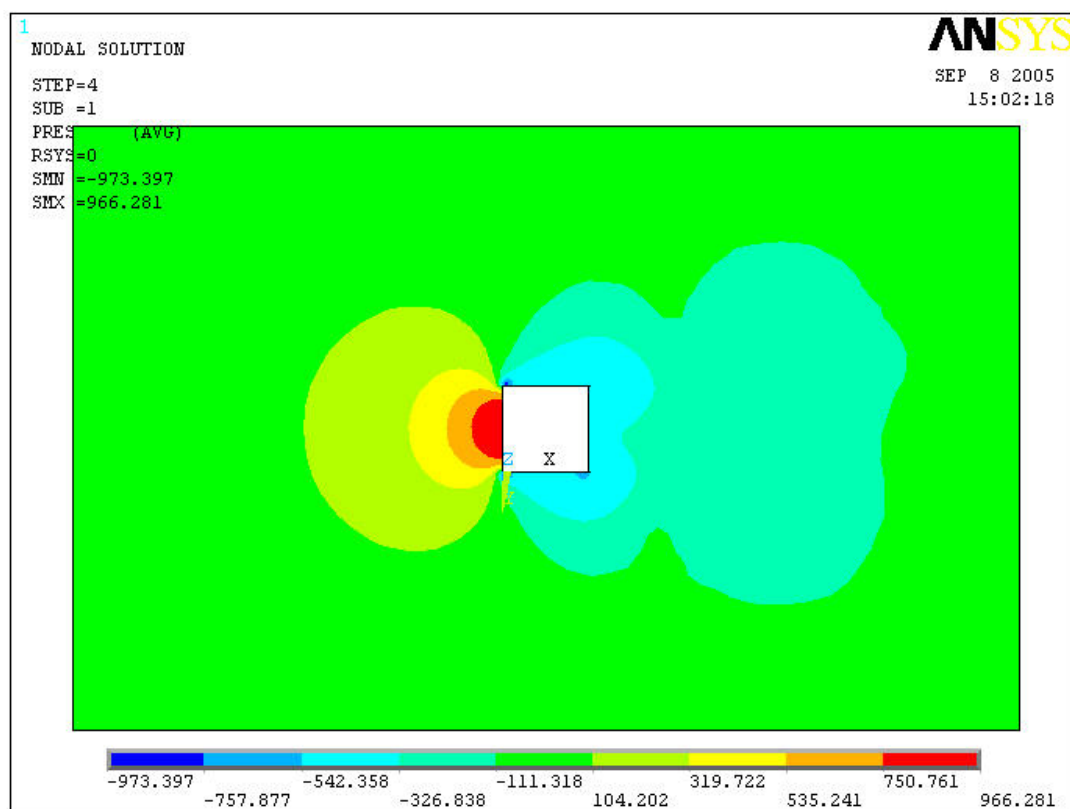


Figura 27 – Campo de pressão em um plano horizontal a 5 metros de altura

As Figuras 28 a 31 ilustram os diagramas de coeficiente de pressão devido à ação do vento ao longo da estrutura apenas para a relação de comprimento, largura e altura de 1x1x1. Os coeficientes de pressão na edificação serão tomados no plano longitudinal no eixo da cumeeira, no plano horizontal a 5 metros de altura, no plano vertical perpendicular à cumeeira no meio da edificação e a uma distância de $a/20$ da face de barlavento da edificação (distância onde apresentaram os maiores valores dos coeficientes de pressão).

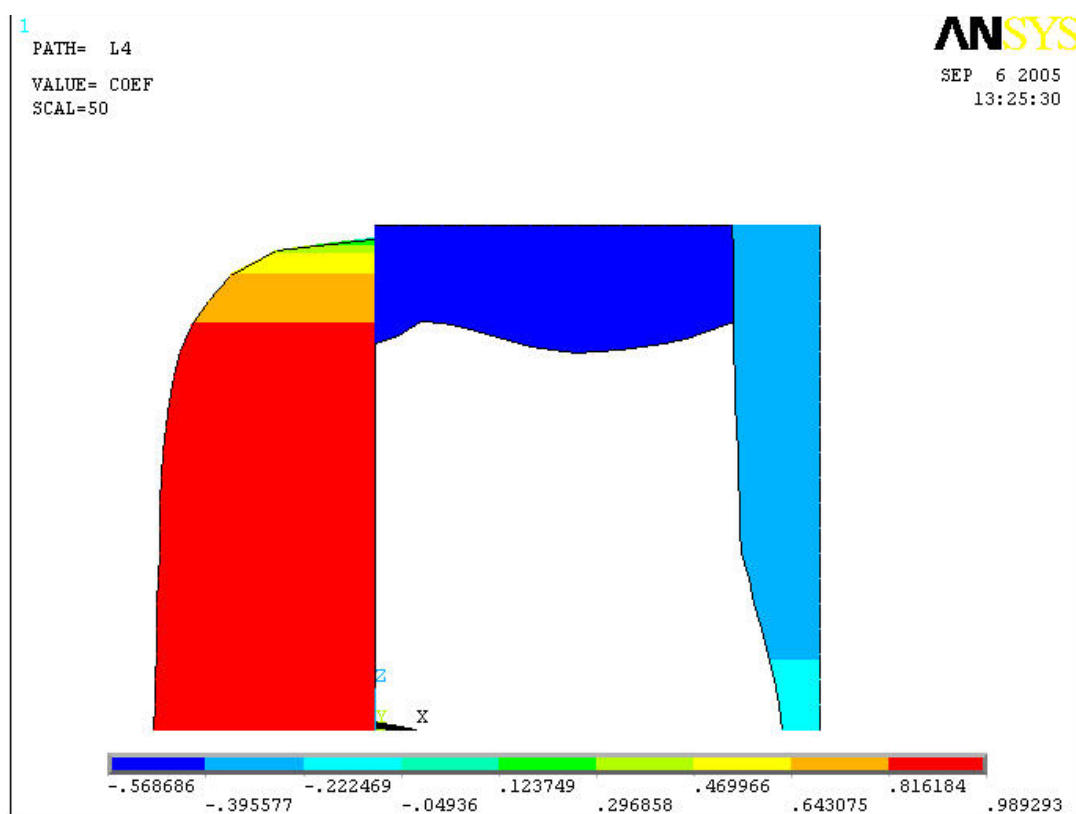


Figura 28 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação em um plano longitudinal no eixo da cumeeira

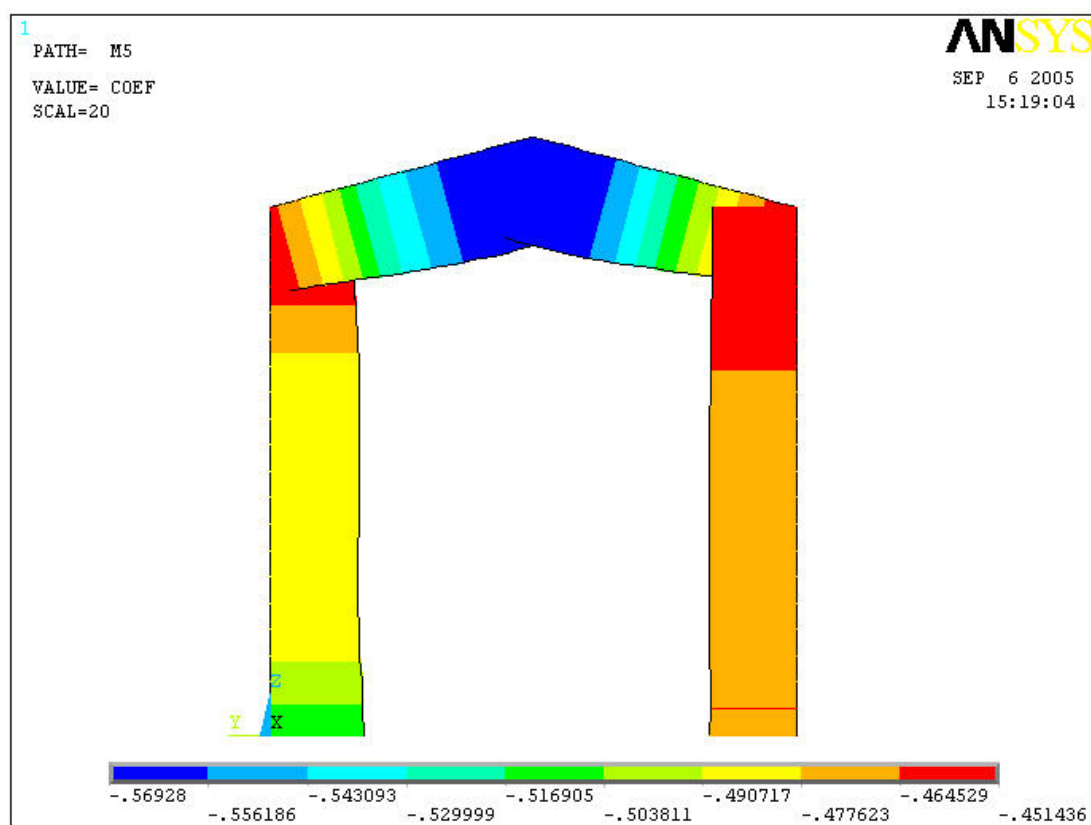


Figura 29 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação, em um plano vertical no meio da edificação

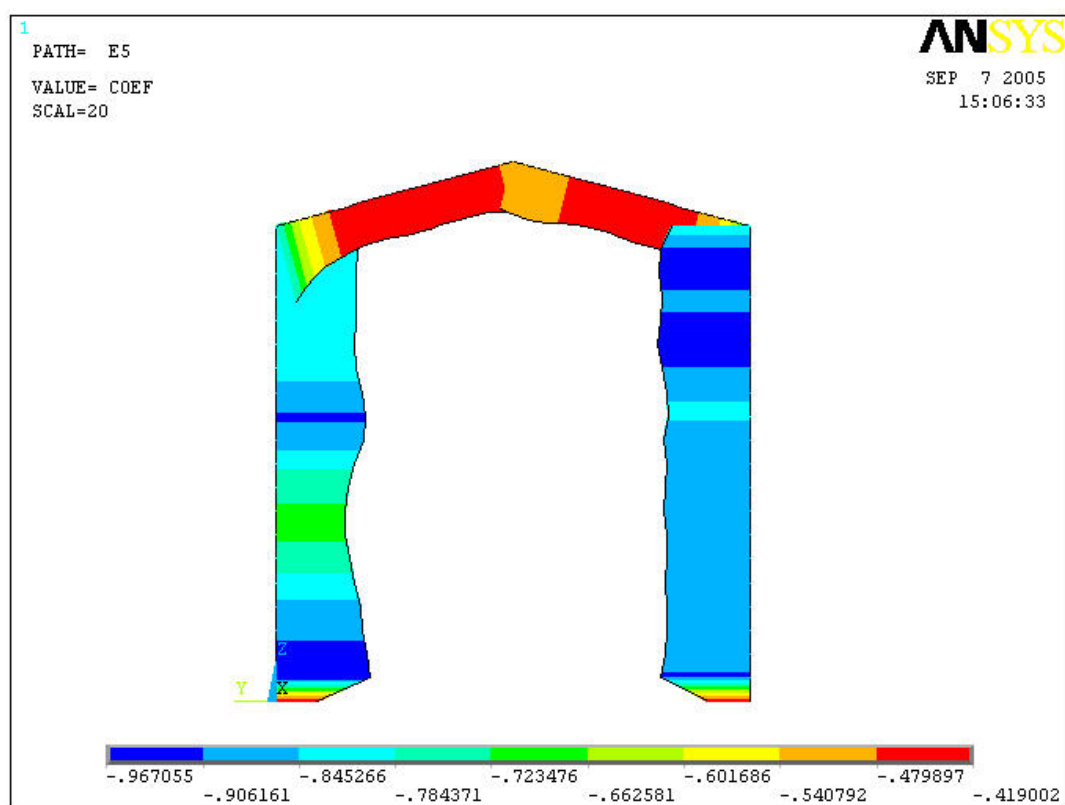


Figura 30 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação em um plano vertical a 0,5 metros da face da cumeeira

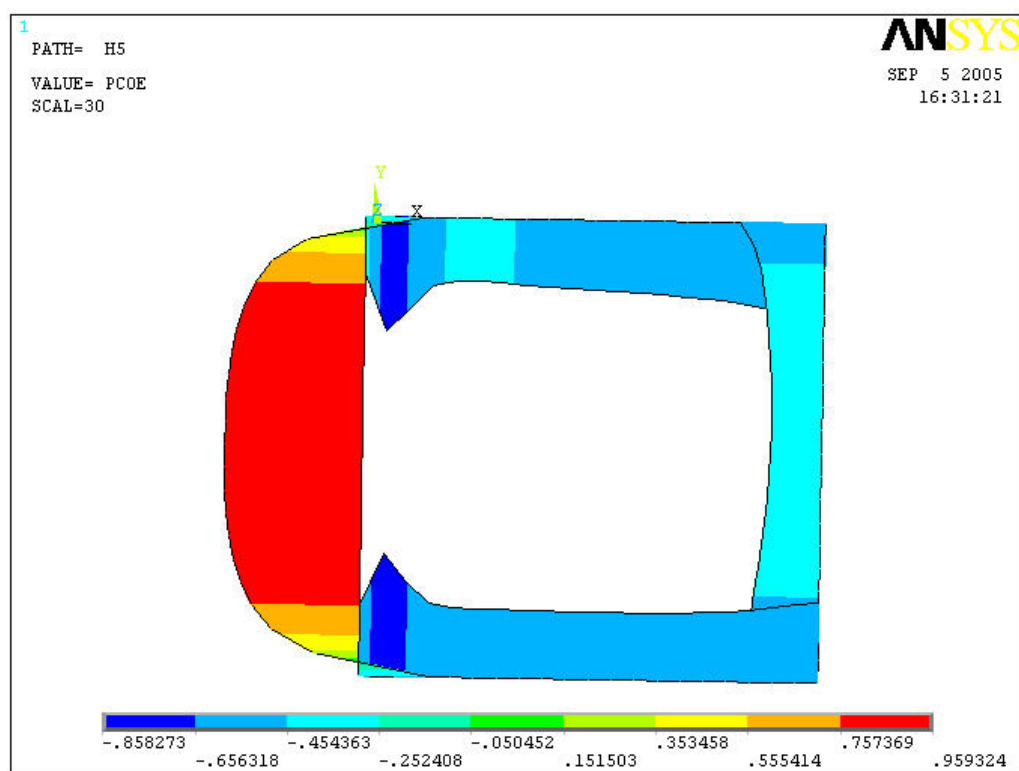


Figura 31 – Diagrama dos coeficientes de pressão na edificação, em um plano horizontal

7.1. Comparação entre Resultados

Neste item será feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo programa ANSYS e os valores obtidos pela NBR 6123 (ABNT,1988) para os coeficientes de pressão nas paredes e no telhado da edificação com inclinação do telhado igual a 15° e ângulo de incidência do vento é igual a 0° .

Relação 10x10x5

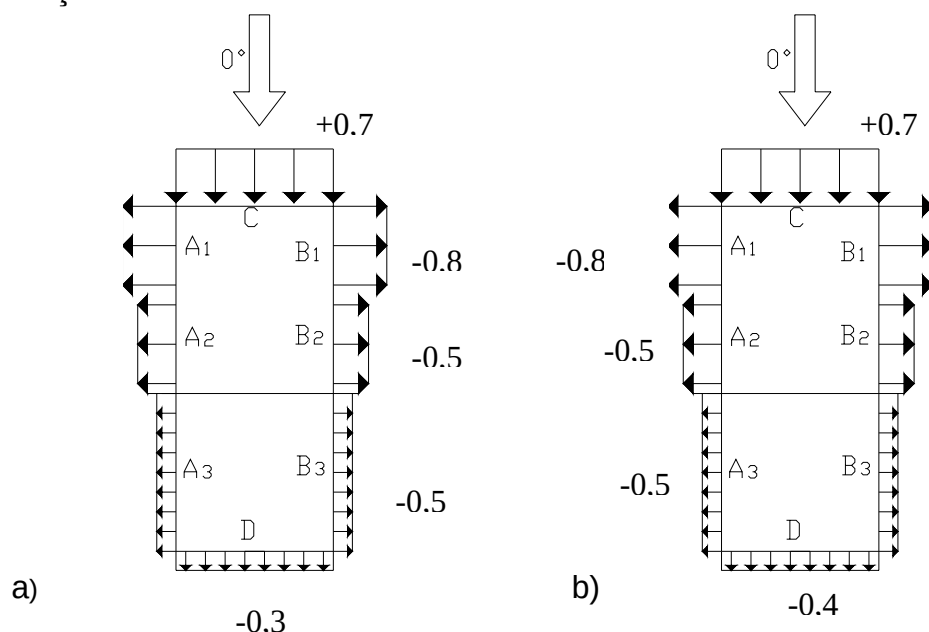


Figura 32 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

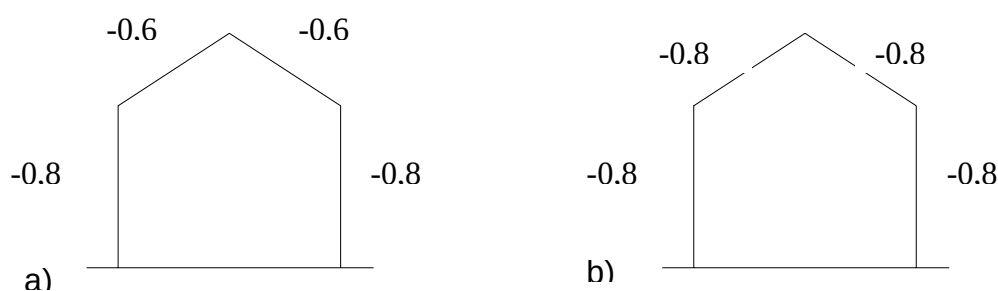


Figura 33 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

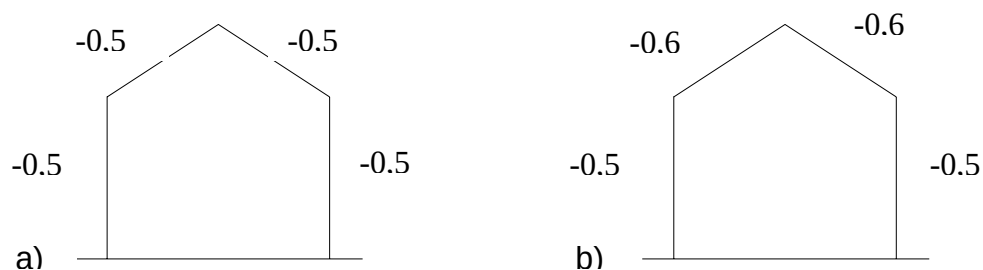


Figura 34 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 10x10x10

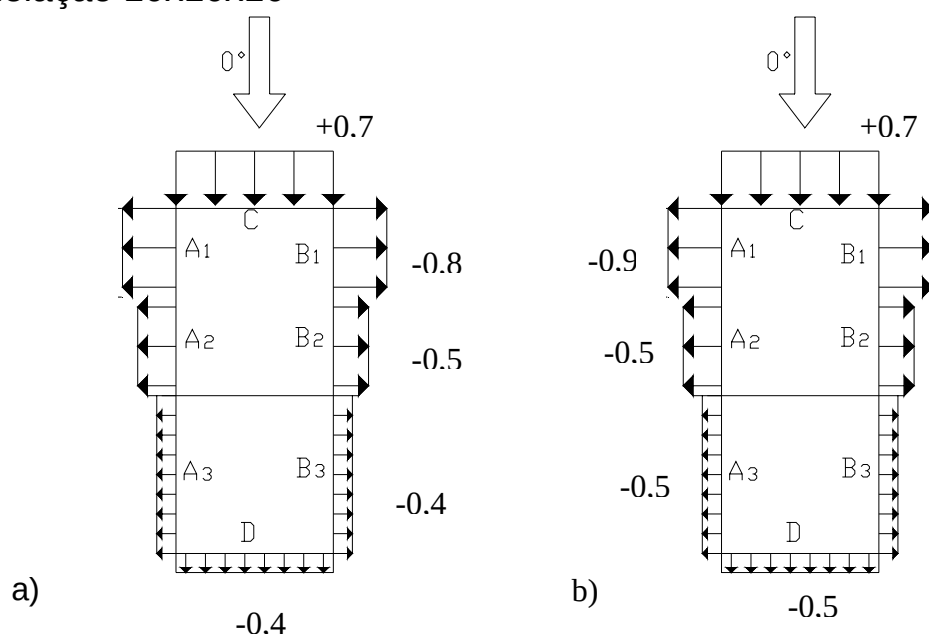


Figura 35 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

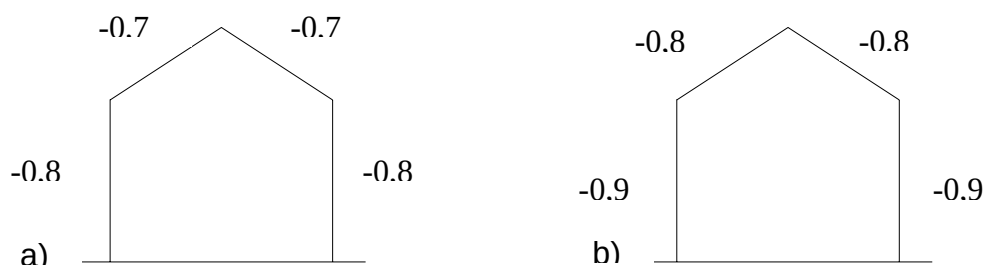


Figura 36 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

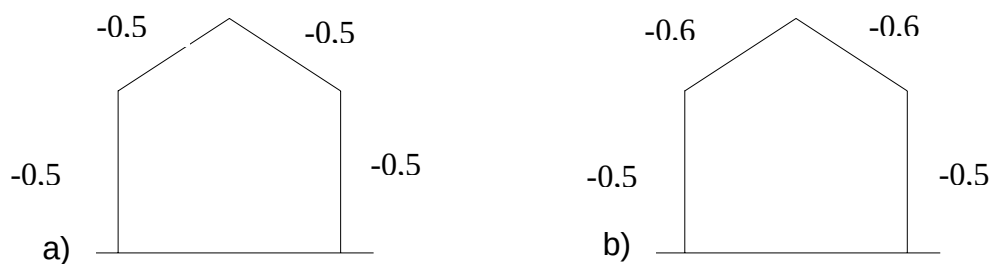


Figura 37 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 10x10x15

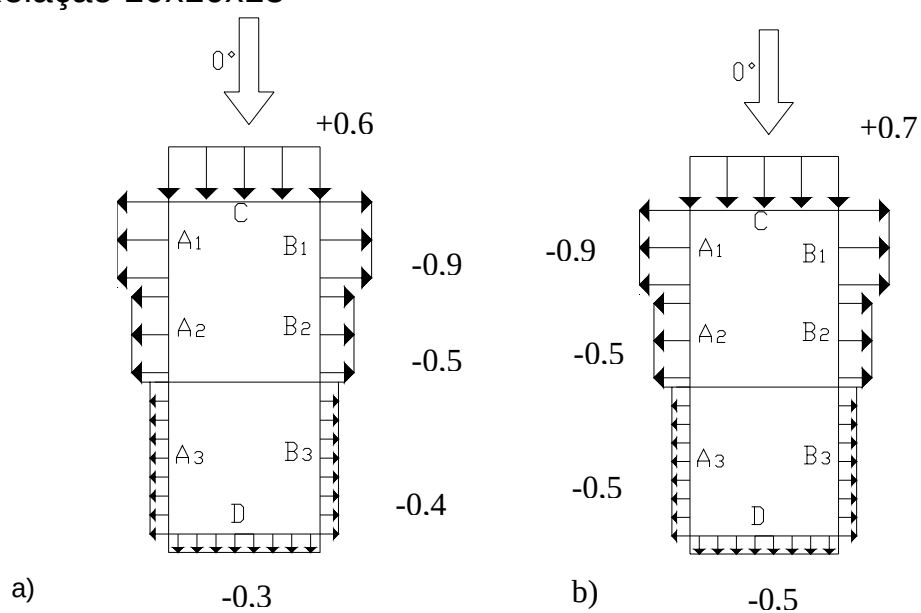


Figura 38 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

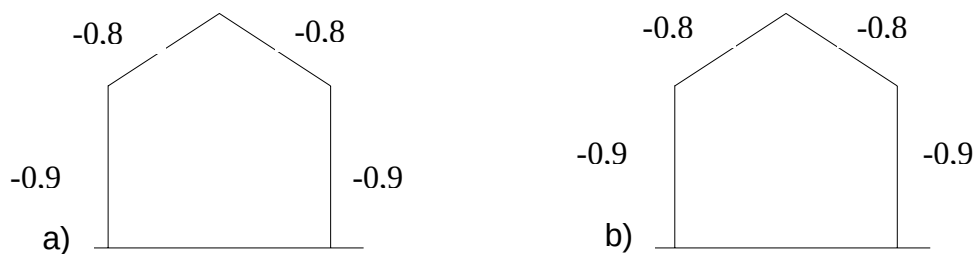


Figura 39 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

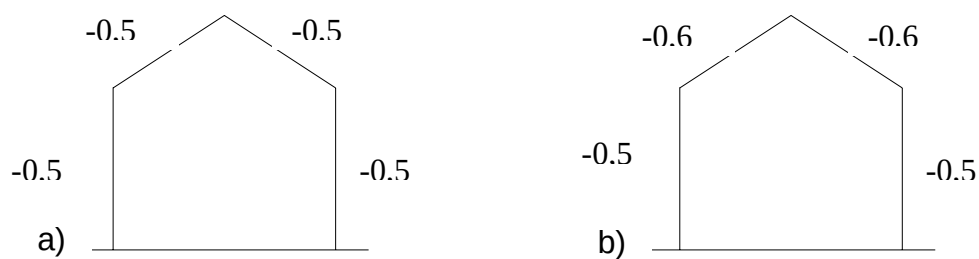


Figura 40 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 10x10x20

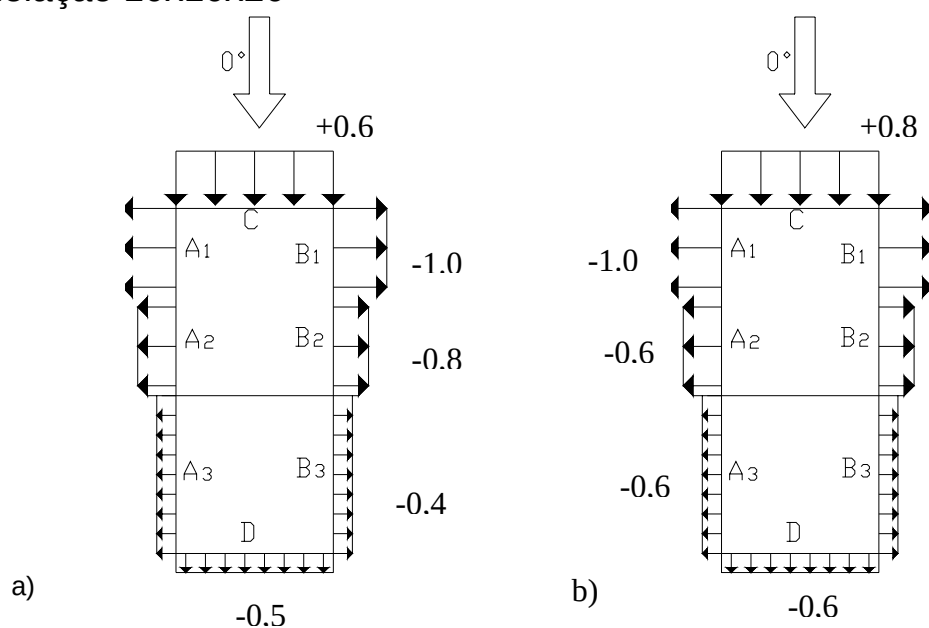


Figura 41 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

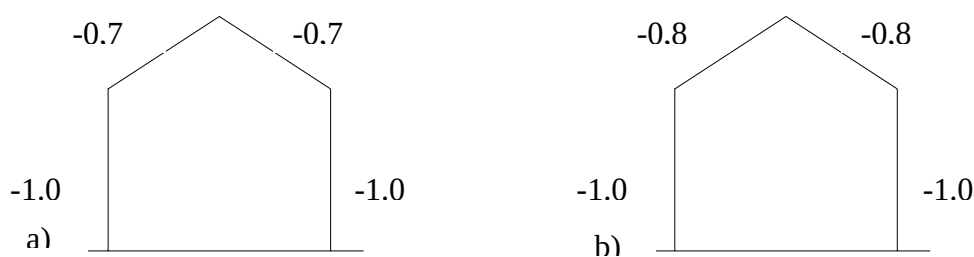


Figura 42 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

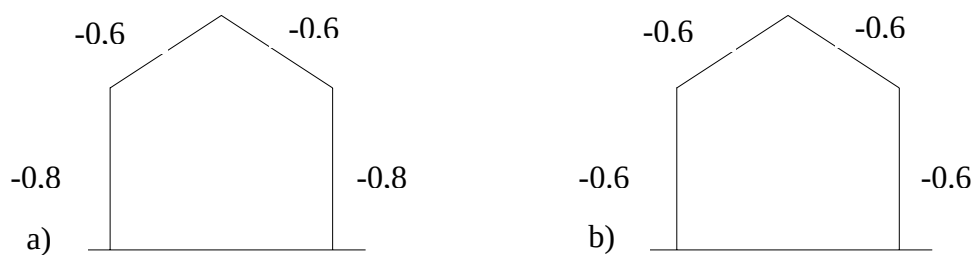


Figura 43 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 15x10x5

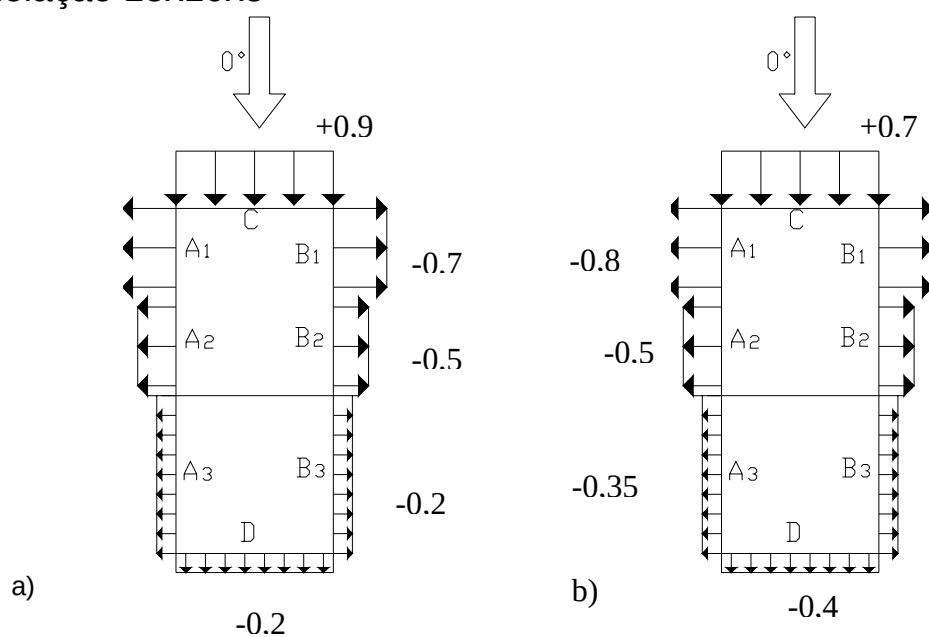


Figura 44 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

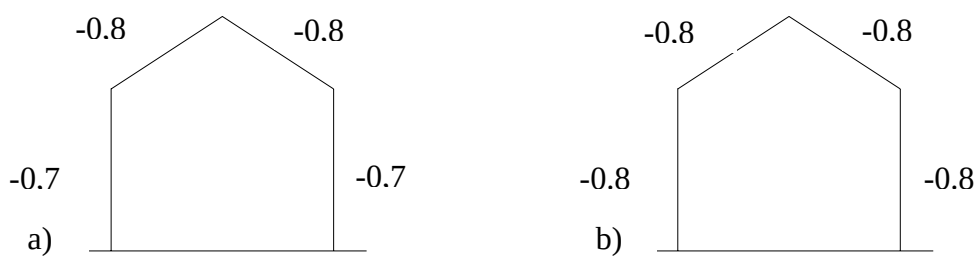


Figura 45 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

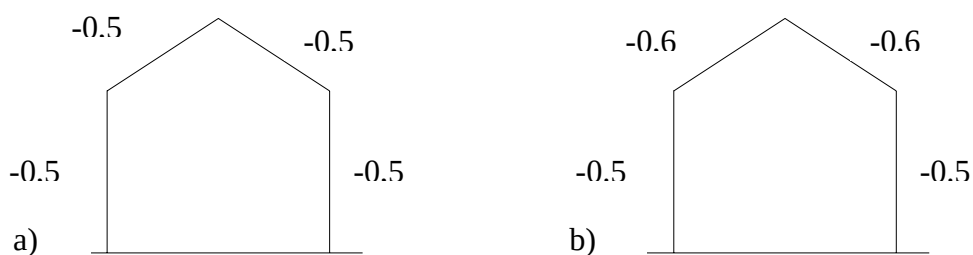


Figura 46 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 15x10x10

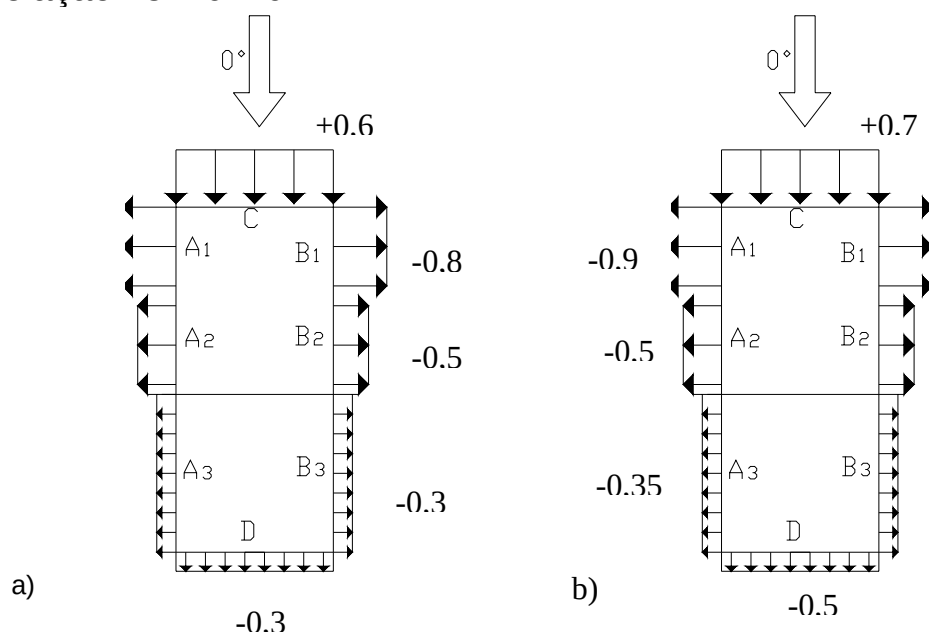


Figura 47 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

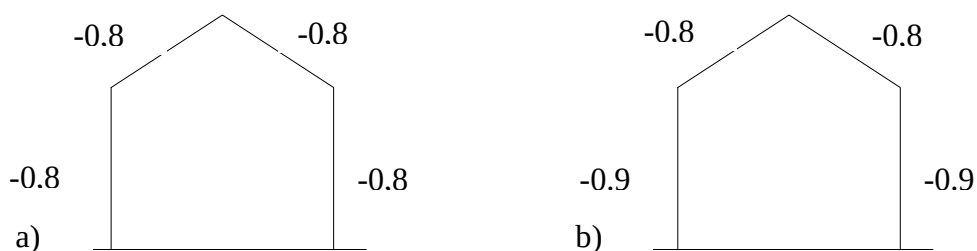


Figura 48 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

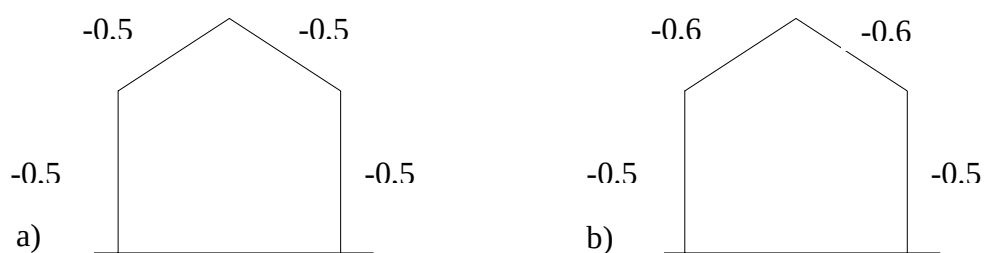


Figura 49 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 15x10x15

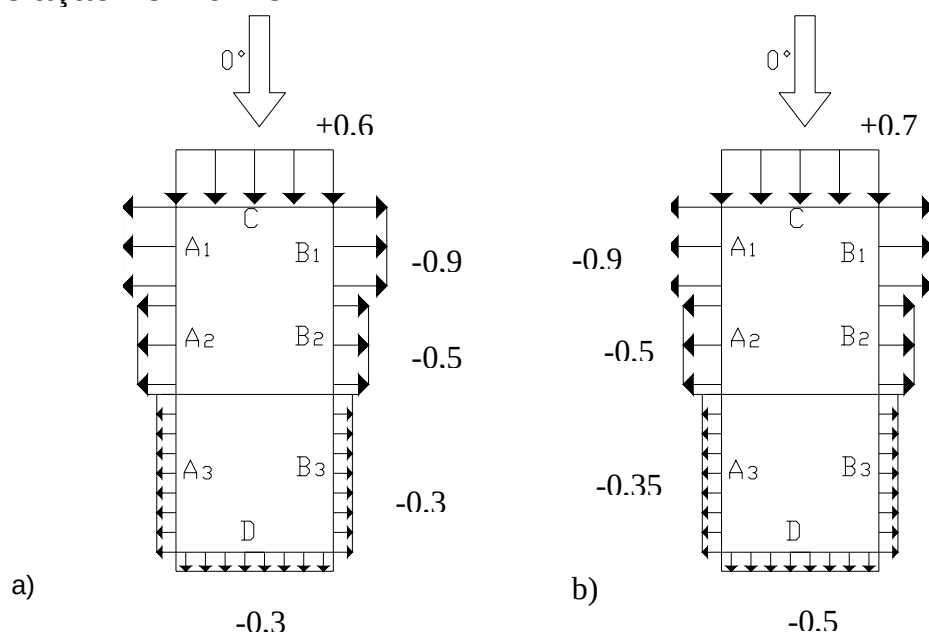


Figura 50 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

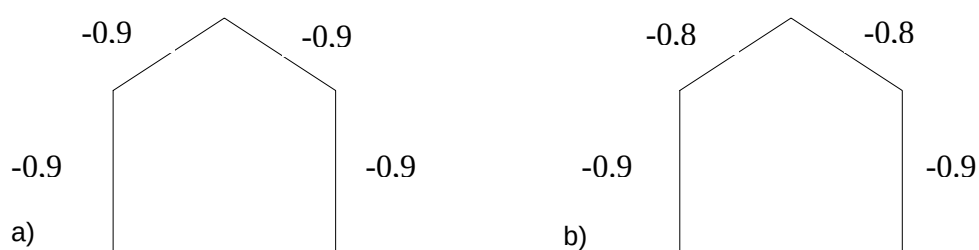


Figura 51 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

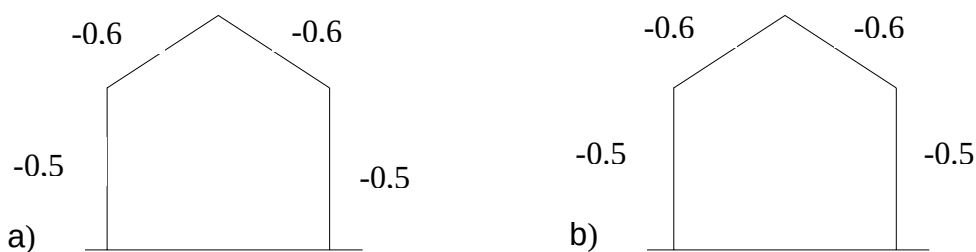


Figura 52 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 15x10x20

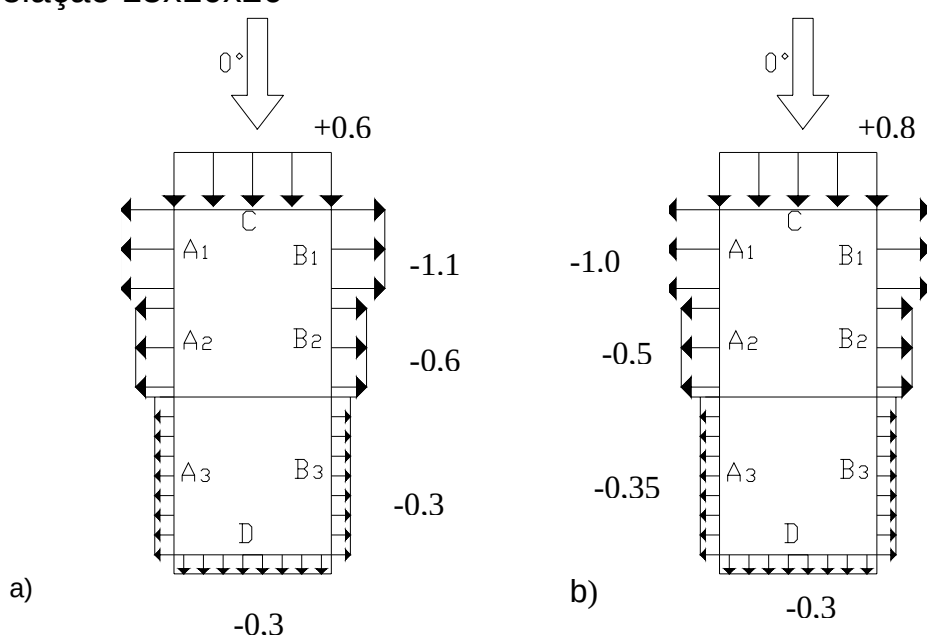


Figura 53 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

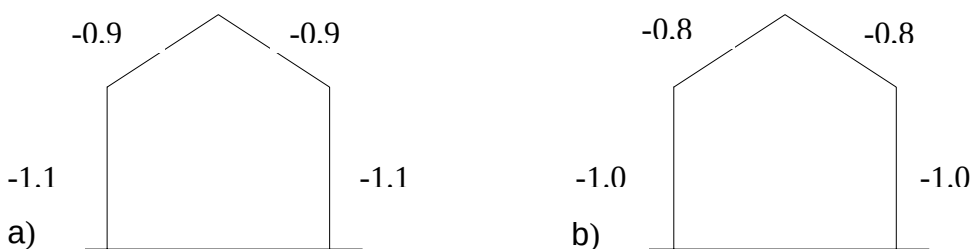


Figura 54 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

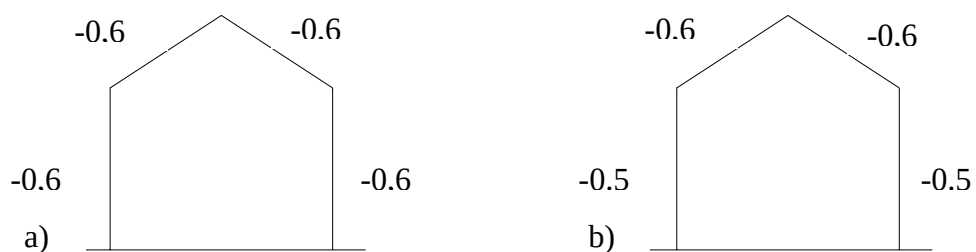


Figura 55 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 20x10x5

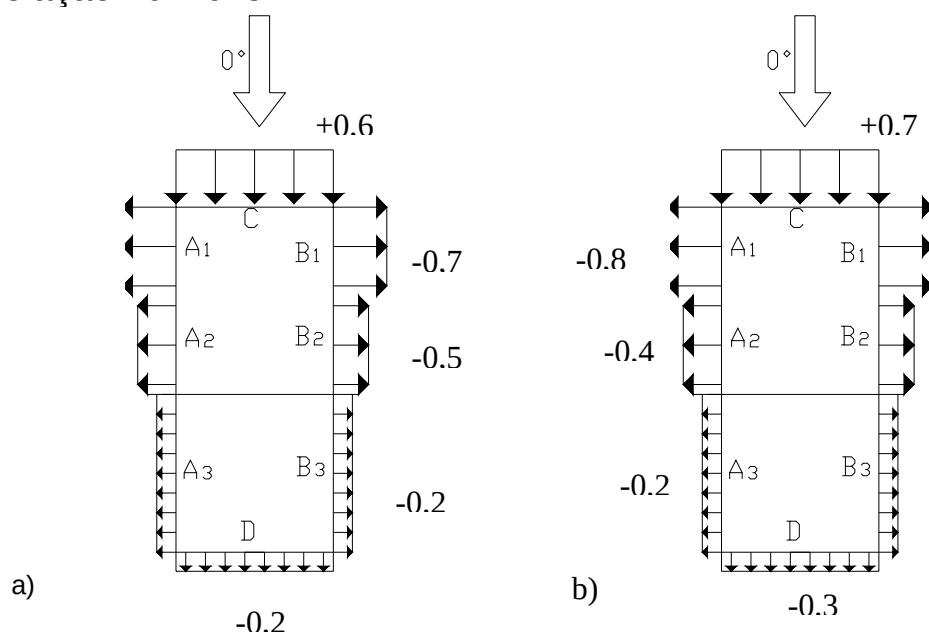


Figura 56 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

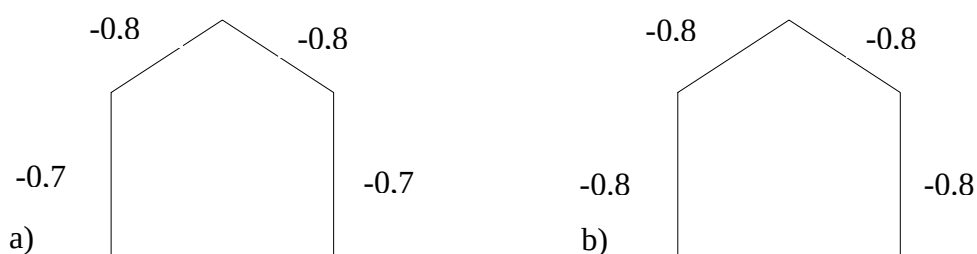


Figura 57 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

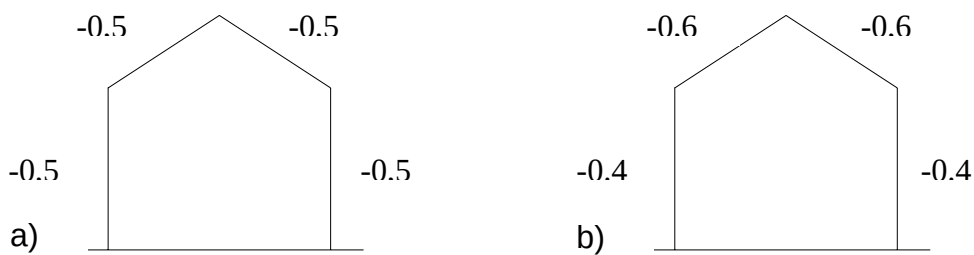


Figura 58 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 20x10x10

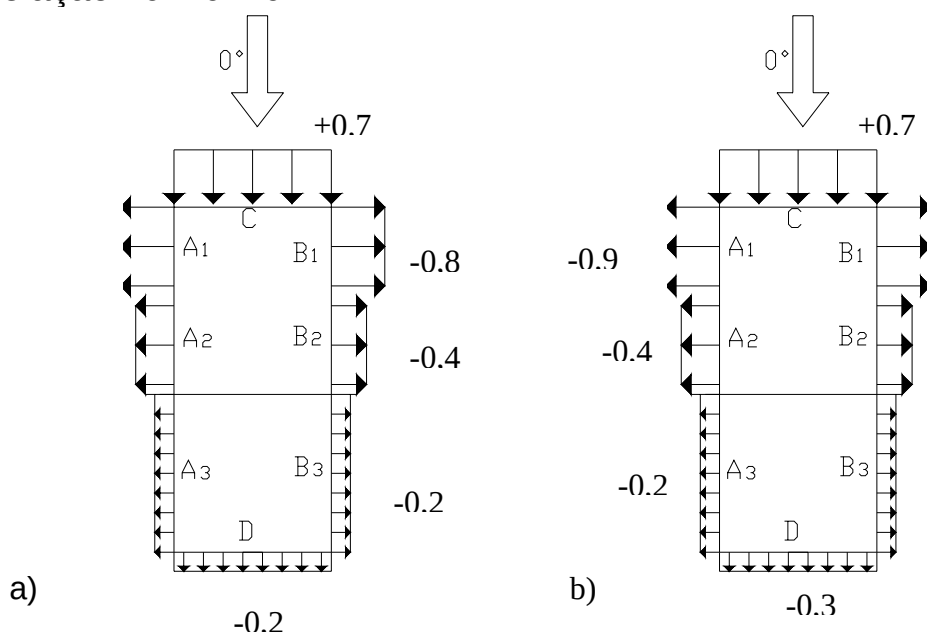


Figura 59 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

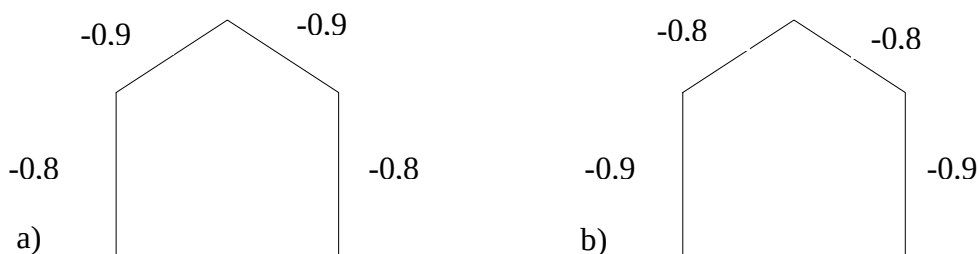


Figura 60 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

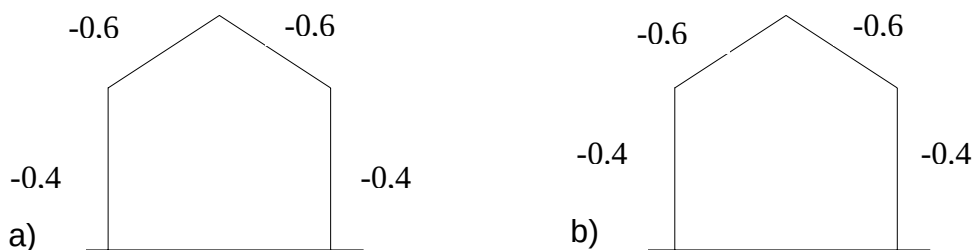


Figura 61 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 20x10x15

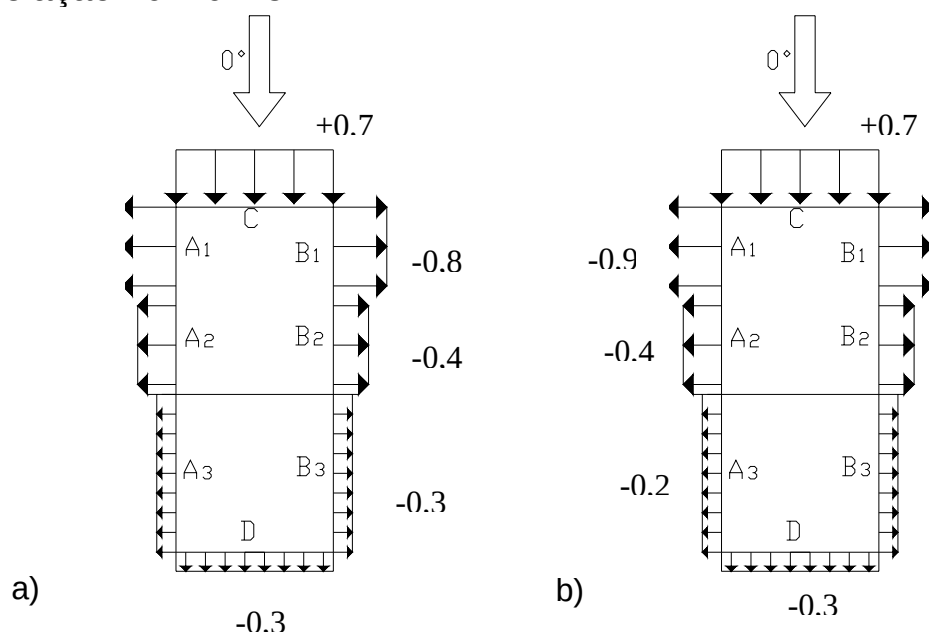


Figura 62 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

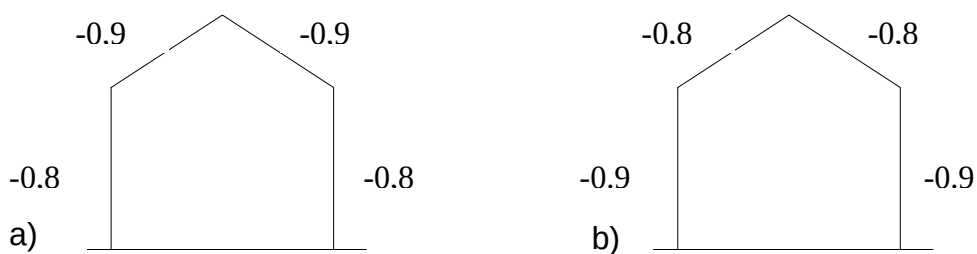


Figura 63 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

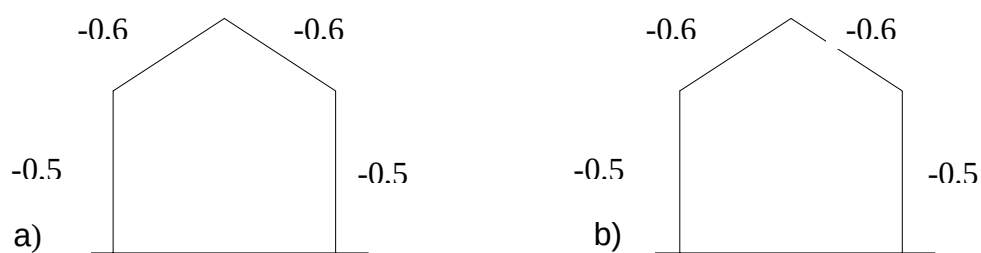


Figura 67 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 40x10x5

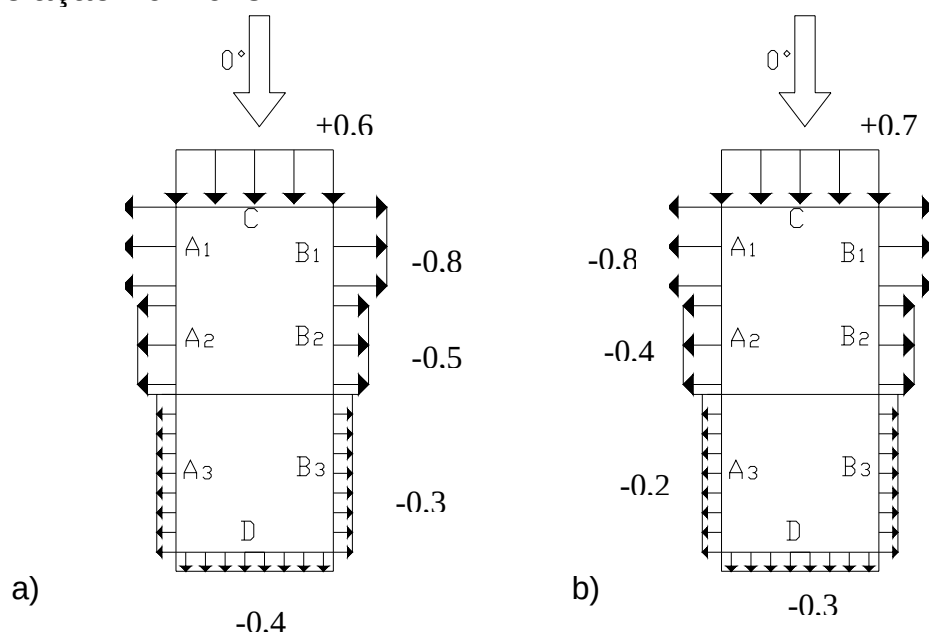


Figura 68 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

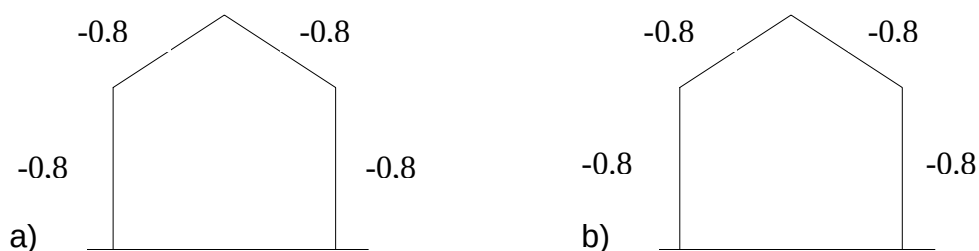


Figura 69 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

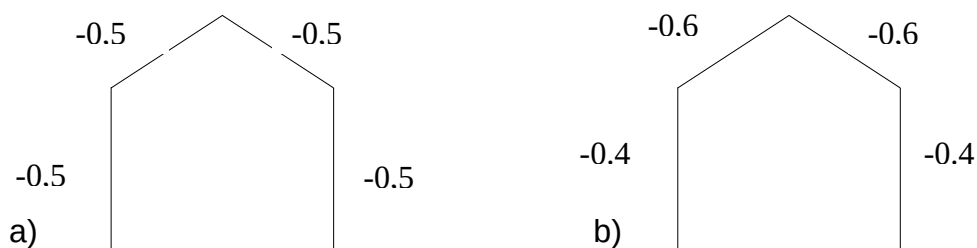


Figura 70 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 40x10x10

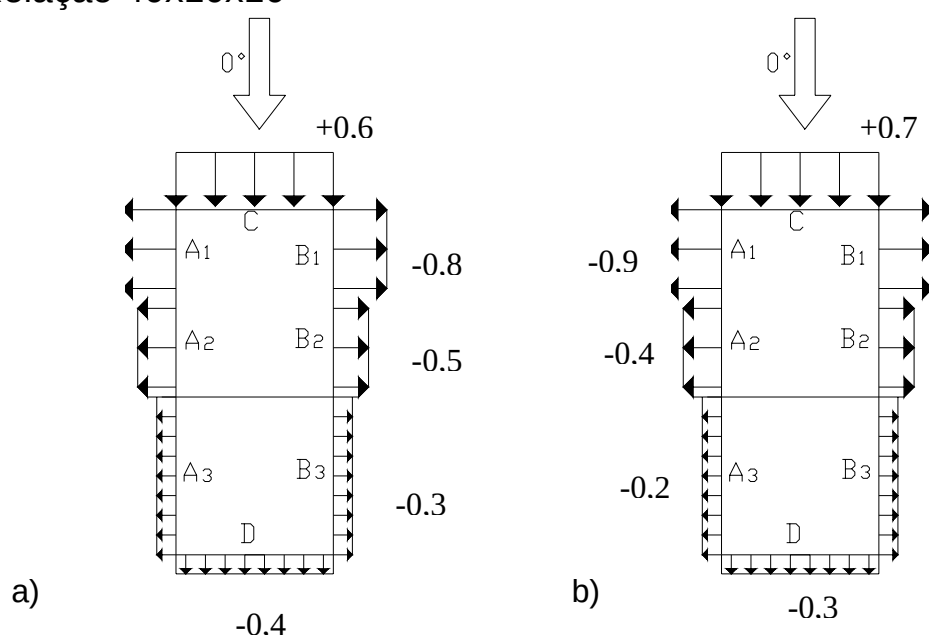


Figura 71 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

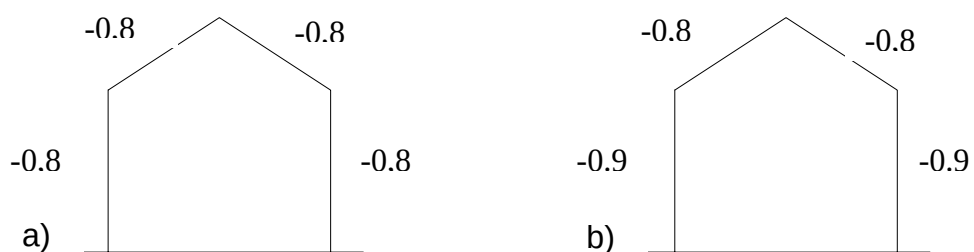


Figura 72 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

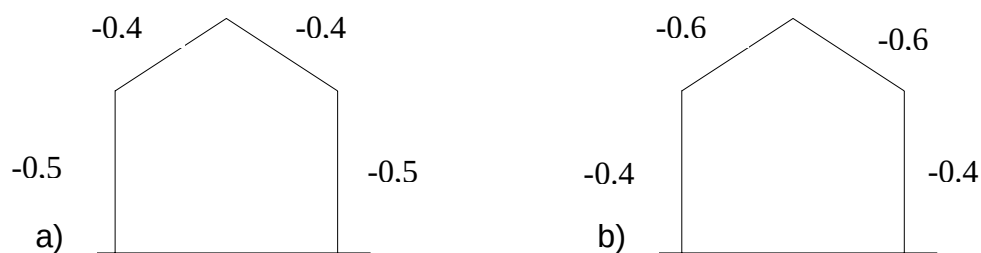


Figura 73 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 40x10x15

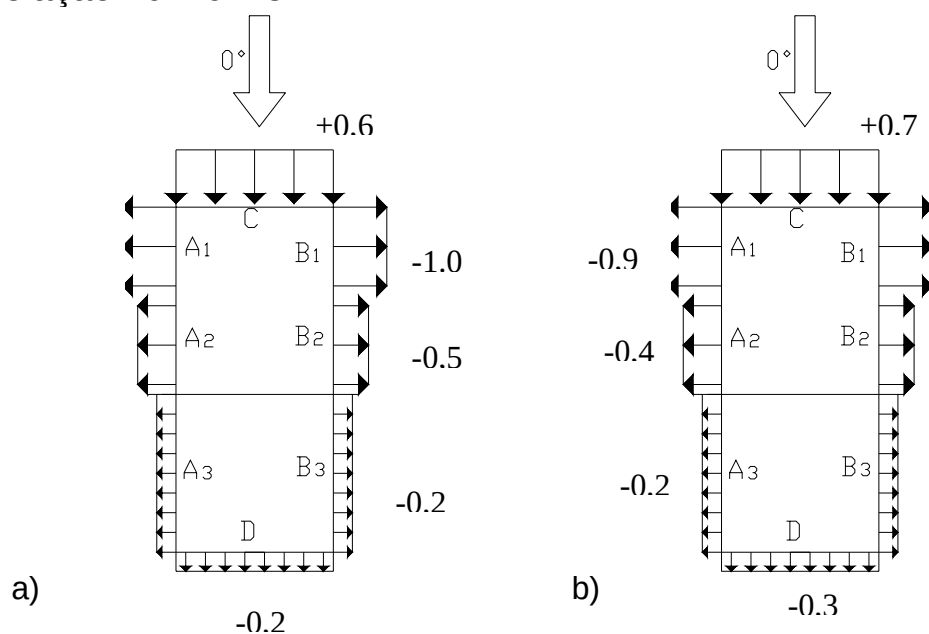


Figura 74 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

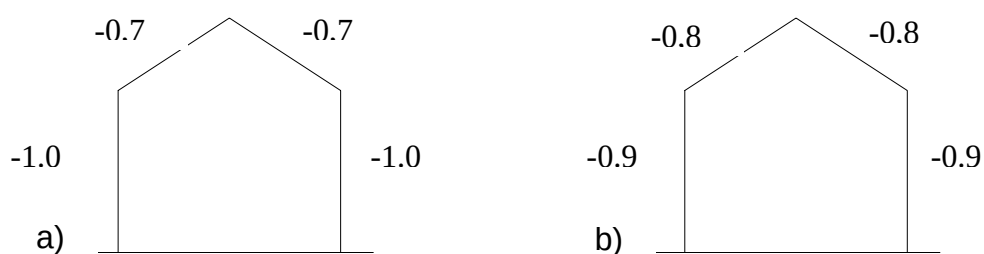


Figura 75 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

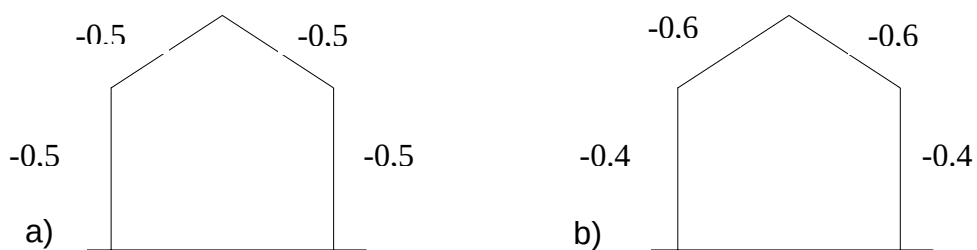


Figura 76 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Relação 40x10x20

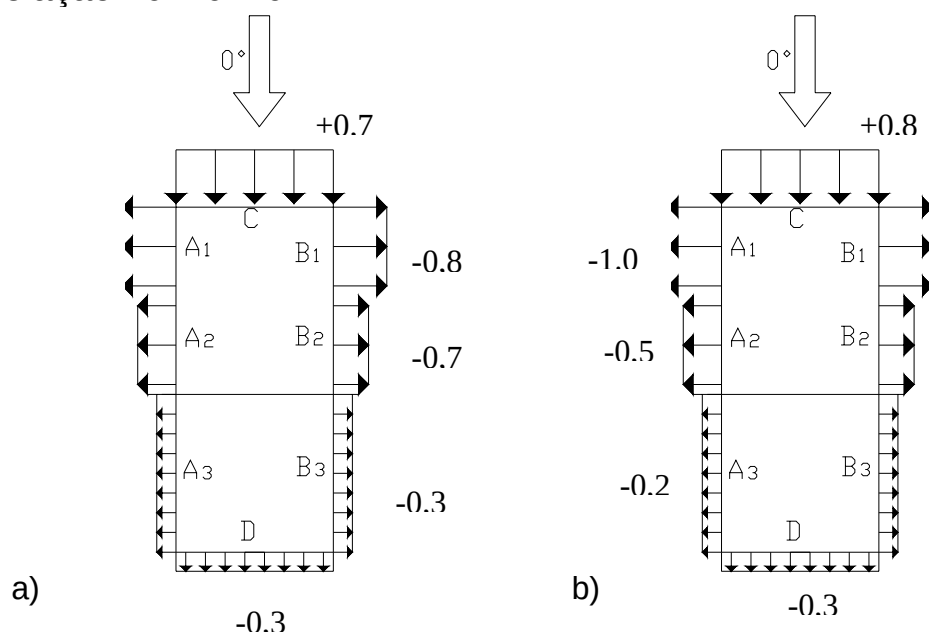


Figura 77 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b)

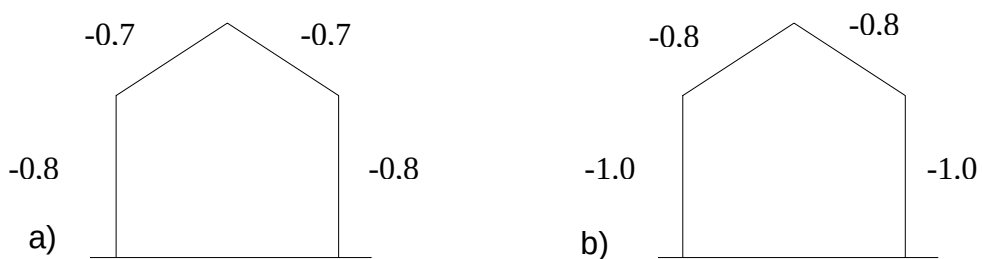


Figura 78 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A1 B1

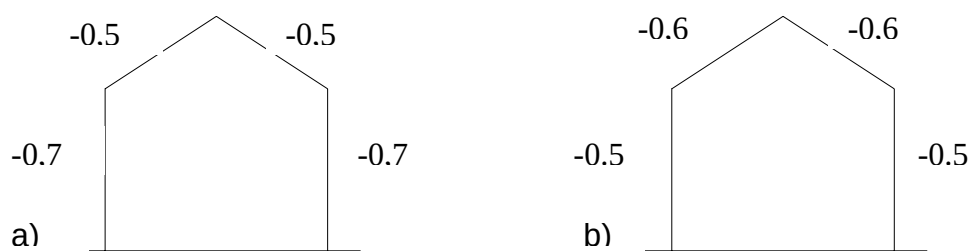
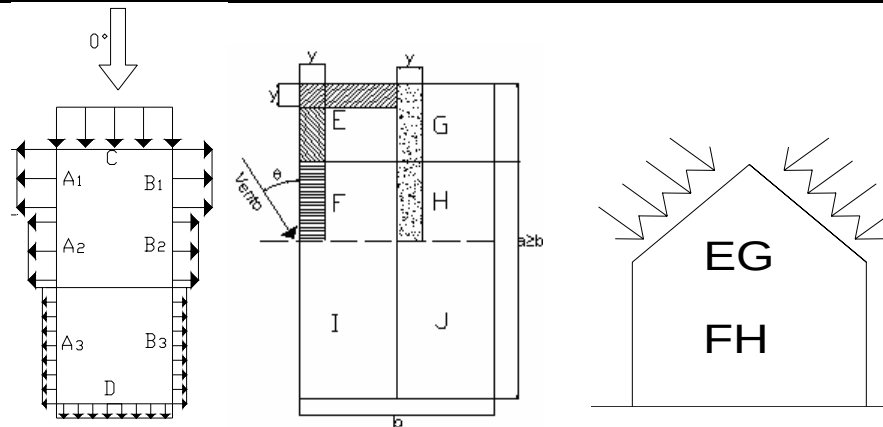


Figura 79 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos pelo Programa ANSYS (a) e pela NBR 6123 (ABNT, 1988) (b) na região A2 B2

Todos os resultados são mostrados na Tabela 6, contendo os valores dos coeficientes de pressão obtidos através do programa ANSYS e os valores obtidos pela NBR-6123:

Tabela 6 – Comparação entre os coeficientes de pressão obtidos através do programa ANSYS e da NBR 6123:1988

Proporções da Edificação	Resultados do ANSYS							Resultados da Norma						
	Região													
	Parede						Telhado	Parede						Telhado
(axbxh)	A1B1	A2B2	A3B3	C	D	EG	FH	A1B1	A2B2	A3B3	C	D	EG	FH
10x10x5	-0,8	-0,5	-0,5	0,7	-0,3	-0,6	-0,5	-0,8	-0,5	-0,5	0,7	-0,4	-0,8	-0,6
10x10x10	-0,8	-0,5	-0,4	0,7	-0,4	-0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-0,5	0,7	-0,5	-0,8	-0,6
10x10x15	-0,9	-0,5	-0,4	0,6	-0,3	-0,8	-0,5	-0,9	-0,5	-0,5	0,7	-0,5	-0,8	-0,6
10x10x20	-1,0	-0,8	-0,4	0,6	-0,5	-0,7	-0,6	-1,0	-0,6	-0,6	0,8	-0,6	-0,8	-0,6
15x10x5	-0,7	-0,5	-0,2	0,9	-0,2	-0,8	-0,5	-0,8	-0,5	-0,4	0,7	-0,4	-0,8	-0,6
15x10x10	-0,8	-0,5	-0,3	0,6	-0,3	-0,8	-0,5	-0,9	-0,5	-0,4	0,7	-0,5	-0,8	-0,6
15x10x15	-0,9	-0,5	-0,3	0,6	-0,3	-0,9	-0,6	-0,9	-0,5	-0,4	0,7	-0,5	-0,8	-0,6
15x10x20	-1,1	-0,6	-0,3	0,6	-0,3	-0,9	-0,6	-1,0	-0,6	-0,4	0,8	-0,3	-0,8	-0,6
20x10x5	-0,7	-0,5	-0,2	0,6	-0,2	-0,8	-0,5	-0,8	-0,4	-0,2	0,7	-0,3	-0,8	-0,6
20x10x10	-0,8	-0,4	-0,2	0,7	-0,2	-0,9	-0,6	-0,9	-0,4	-0,2	0,7	-0,3	-0,8	-0,6
20x10x15	-0,8	-0,4	-0,3	0,7	-0,3	-0,9	-0,6	-0,9	-0,4	-0,2	0,7	-0,3	-0,8	-0,6
20x10x20	-0,9	-0,5	-0,2	0,6	-0,2	-0,8	-0,6	-1,0	-0,5	-0,2	0,8	-0,3	-0,8	-0,6
40x10x5	-0,8	-0,5	-0,3	0,6	-0,4	-0,8	-0,5	-0,8	-0,4	-0,2	0,7	-0,3	-0,8	-0,6
40x10x10	-0,8	-0,5	-0,3	0,6	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9	-0,4	-0,2	0,7	-0,3	-0,8	-0,6
40x10x15	-1,0	-0,5	-0,2	0,6	-0,2	-0,7	-0,5	-0,9	-0,4	-0,2	0,7	-0,3	-0,8	-0,6
40x10x20	-0,8	-0,7	-0,3	0,7	-0,3	-0,7	-0,5	-1,0	-0,5	-0,2	0,8	-0,3	-0,8	-0,6



7.2. Interação Fluido-Estrutura

Uma vez determinada às pressões devidas à ação do vento na edificação, é interessante que esses valores sejam aplicados na estrutura para ter-se a avaliação do comportamento estrutural segundo essas pressões. Dessa maneira o programa ANSYS permite que essa análise seja feita considerando-se a interação fluido-estrutura.

O edifício a ser analisado terá dimensões com relações geométricas entre a altura e largura (h/b) iguais a 1, sendo a cobertura um telhado de duas águas, com inclinação de 15° . O ângulo de incidência do vento será de 90° (perpendicular à cumeeira).

Será utilizado o Fluid141 para a análise do fluido, e o Plane 42 para a análise estrutural. O elemento Plane42 é usado para o modelo do sólido estrutural em duas dimensões, podendo ser usado tanto como elemento plano quanto como elemento assimétrico. Este elemento é definido por quatro nós tendo dois graus de liberdade em cada nó: translação na direção nodal x e y .

Os dados de entrada do elemento incluem quatro nós, espessura (somente para deformações planas) e materiais com propriedades ortotrópicas.

A geometria, localização dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento estão mostrados na Figura 80.

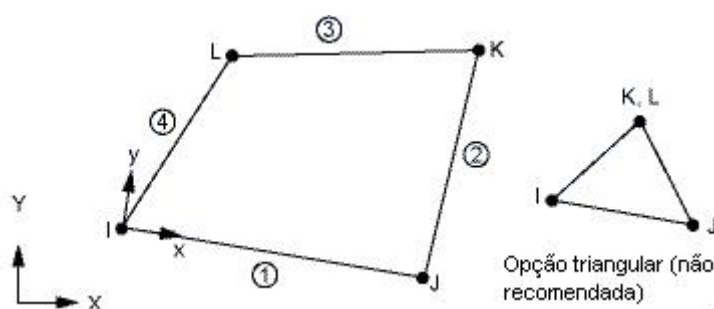


Figura 80 – Geometria, localização dos nós e o sistema de coordenadas do elemento. Fonte: Ansys 9.0

O Fluid141 pode ser utilizado para modelo transiente ou permanente envolvendo regiões fluidas e ou não fluidas. As equações de conservação para fluxo fluido viscoso e energia são resolvidas na região fluida, enquanto só a equação de energia é resolvida em uma região não fluida.

O sistema de equações pode ser resolvido, rotacionando o sistema de coordenadas, com uma velocidade angular constante. Os graus de liberdade são: velocidade, pressão e temperatura. Duas quantidades de turbulência, a energia cinética de turbulência e a taxa de dissipação de energia cinética, são calculadas quando se escolhe um modelo de turbulência opcional.

O fluido onde a edificação está inserida possui as seguintes características: fluido turbulento, incompressível, isotérmico, com densidade de $1,23 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade de $1,79\text{e-}005 \text{ kg/ms}$. Já o elemento estrutural plano utilizado possui as seguintes características: coeficiente de Poisson igual a $0,3$ e módulo de elasticidade igual a $20500 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$.

A Figura 81 e 82 mostra a discretização da região fluídica e do elemento estrutural respectivamente.

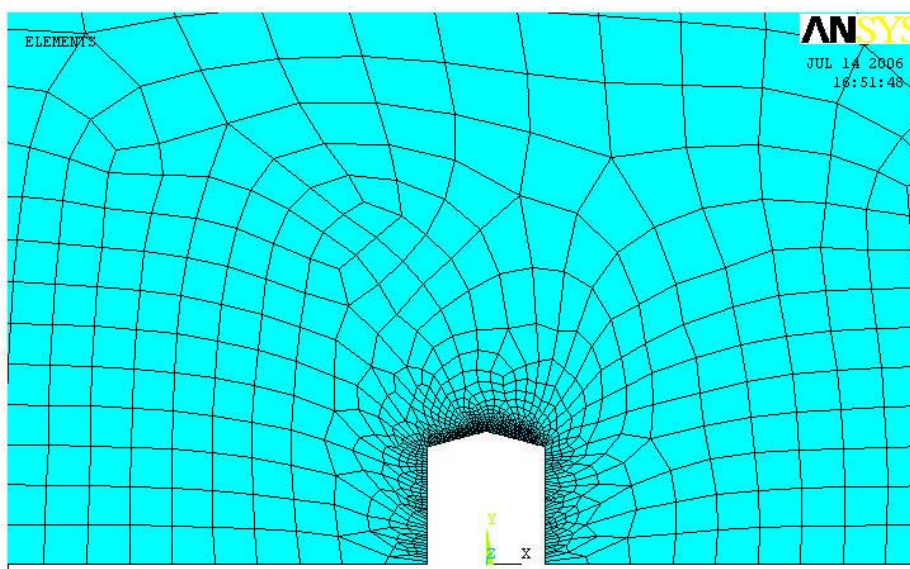


Figura 81 – Discretização da região fluídica

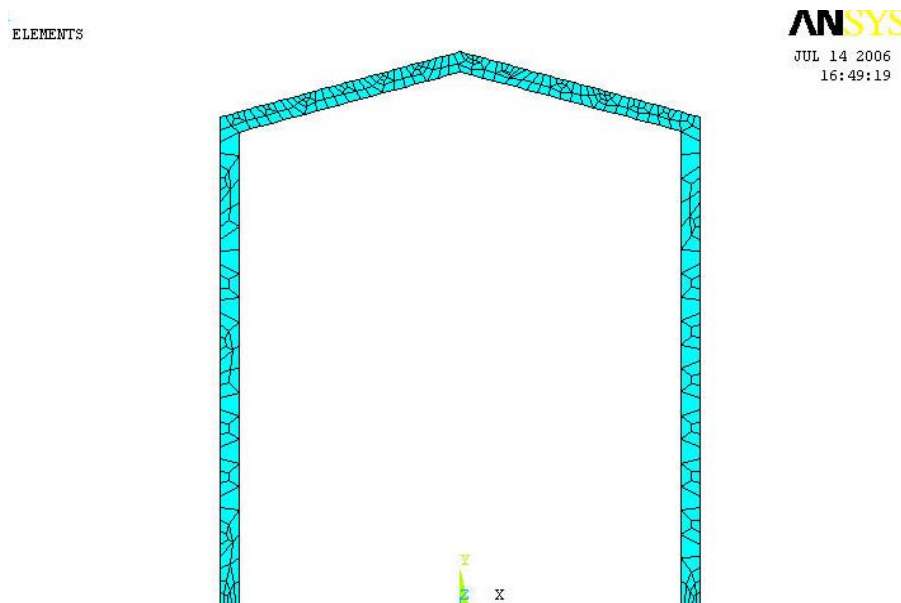


Figura 82 – Discretização da Estrutura

Para a simulação da interação fluido-estrutura, foram aplicadas as seguintes condições de contorno:

- Na face à montante, na direção do vento a velocidade de entrada do vento V_x é igual a 40 m/s;
- Na face inferior e em todas as faces da edificação, $V_x=V_y=0$ (condição de não deslizamento);
- Nas face superior e na face posterior, a pressão é igual a zero.

Na análise da solução obtida pelo ANSYS para a interação fluido-estrutura, além das características já mencionadas na subseção anterior, pode-se verificar também os deslocamentos, a forma deformada e as tensões de Von Mises para o elemento estrutural como mostrado na Figura 83 e 84 :

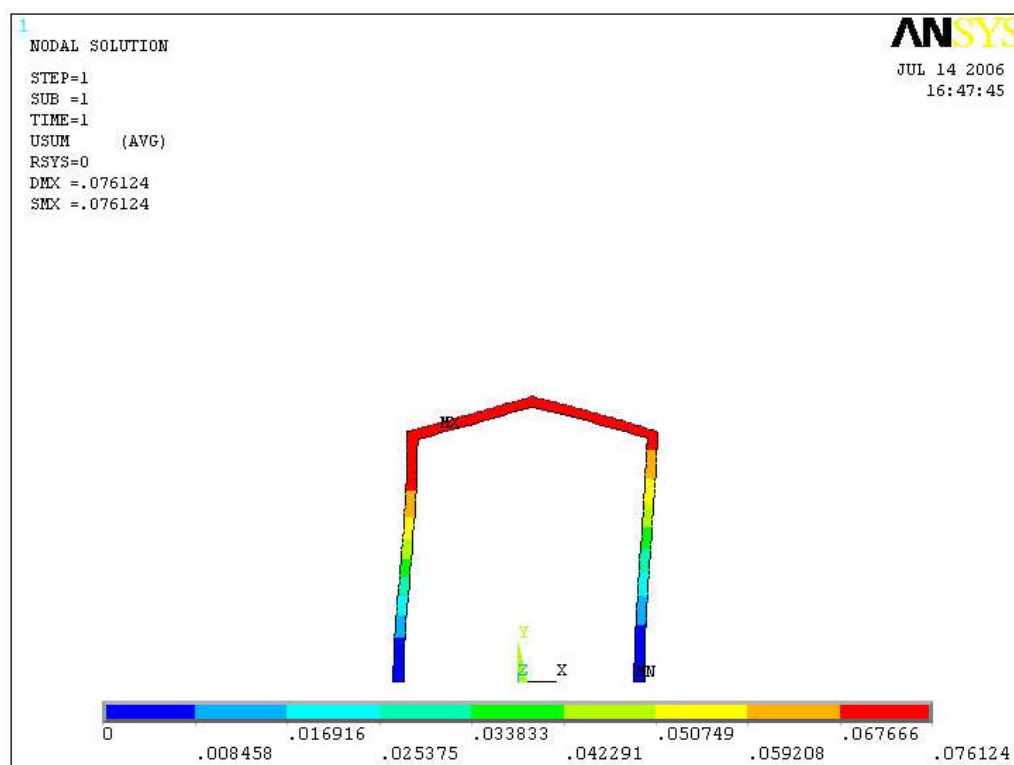


Figura 83 – Deslocamentos

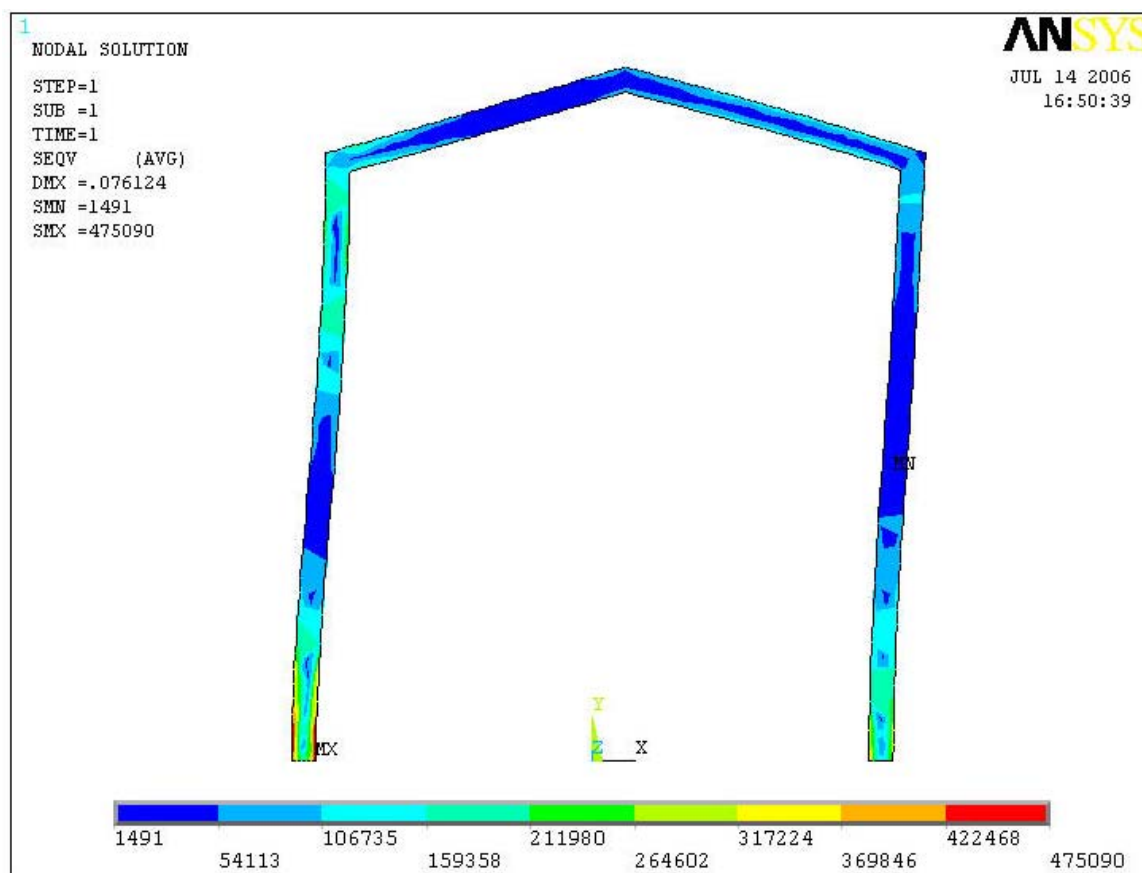


Figura 84 – Tensão de Von Mises

8. CONCLUSÕES

Os coeficientes de pressão obtidos nos ensaios numéricos efetuados através do programa ANSYS para inclinação do telhado de 15°, mostraram-se coerentes do ponto de vista aerodinâmico, quando comparados com os valores normativos.

De maneira geral, os valores dos coeficientes de pressão não foram muito elevados aproximando-se dos valores apresentados pela norma. Cerca de apenas 13% dos resultados tiveram uma variação dos coeficientes de pressão maior que 0,1.

Embora esses coeficientes de pressão obtidos através do programa ANSYS são da mesma ordem de grandeza dos valores normativos, os coeficientes de pressão na região A_3B_3 e D foram os que apresentaram maior divergência quando comparados com os valores fornecidos pela NBR 6123 (ABNT,1988). Acredita-se que os valores normatizados apresentam coeficientes maiores do que realmente ocorrem, pois quanto maior o comprimento da edificação, menor é o efeito da sucção nas paredes a sotavento.

Para os coeficientes de pressão nas regiões a barlavento, os valores apresentam-se bem próximos daqueles utilizados pela Norma. Em todos os casos estudados, pôde-se ver claramente a formação do bulbo de alta sucção nas paredes.

Na interação fluido-estrutura, pode-se observar uma ferramenta importante proporcionada pelo programa ANSYS que pode ser utilizada para determinar o comportamento estrutural. Uma vez obtida as pressões que agem na edificação devidas à ação do vento, é possível aplicá-las na estrutura e obter o seu deslocamento e também as tensões que atuam nos elementos estruturais.

O edifício analisado na interação fluido-estrutura foi simulado bi-dimensionalmente, onde o elemento estrutural considerado é do tipo SHELL PLANE42, elemento plano da biblioteca do ANSYS. No caso de efetuar uma análise tridimensional, é importante observar que, o elemento utilizado deve ser tipo BEAM 3D ELASTIC 4, elemento tridimensional da biblioteca do ANSYS.

Assim, com base nos dados apresentados neste estudo, constata-se a eficiência da simulação numérica através do programa ANSYS, na obtenção dos coeficientes de pressão das edificações. Desta maneira, através do programa

ANSYS, podem-se continuar os estudos para obtenção dos coeficientes de pressão para estruturas com diversas geometrias e compará-las com os valores normativos e além disso, obter o comportamento estrutural através das tensões nos elementos estruturais e o deslocamento da estrutura.

9. REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.110p.

BERTOLINO, JR. R. et al. *Análise e dimensionamento estrutural de torres circulares de aço*. In: JORNADAS SUL AMERICANAS, XXIX, 2000, Punta Del Este. CD ROM.

BLESSMANN, J. Pavilhões Industriais. In: Joaquim Blessmann. *Ação do Vento em Edificações*. Porto alegre: Sagra, 1991. p. 77-104.

BLESSMANN, J., Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 1 ed. Porto Alegre (RS): Universidade/UFRS, 1998. 235p.

BLESSMANN, J. *Ação do vento em telhados a quatro águas*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, XXXI, 2004, Mendoza. 19p.

BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. *Análise numérica da ação do vento na ponte sobre o rio Guamá (Estado do Pará, Brasil)*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, XXXI, 2004, Mendoza. 17p.

CARRIL JUNIOR, C. F. et al. *Ação do vento sobre a cobertura do centro de eventos culturais e esportivos Pe. Vitor Coelho*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, XXXI, 2004, Mendoza. 13p.

CHOI, C. K.; YU, W. J. Finite element techniques for wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.81, p. 83-95, 1999.

GAO, Y.; CHOW, W.K. Numerical studies on air flow around a cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v93, p. 115-135, 2005.

HO, T. C. E. et al. The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: Part 1. Archiving format and basic aerodynamic data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. v. 93, p. 1-30, 2005.

LI, Y. Q.; TAMURA. Y. Wind-Resistant Analysis for Large-span Single-layer Reticulated Shells. *International Journal of Space Structure*. v. 19 No. 1, p. 47-59, 2004.

LIN, N. et al. Characteristics of wind force acting on tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.93, 217-242, 2005.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. *Ação do vento sobre o empreendimento SP-Willness*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, XXXI, 2004, Mendoza. 14p.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. *Estudo da ação estática do vento sobre a cobertura do estádio Castelão*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, XXXI, 2004, Mendoza. 14p.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. *Ação estática do vento sobre um edifício esbelto de concreto armado*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, XXXI, 2004, Mendoza. 14p.

NEGM, H. M.; MAALAWI, K.Y. Structural design optimization of wind turbine towers. *Computers and Structures*, v.74, p. 649-666, 2000.

OLIVEIRA, V.; *Análise dinâmica de torres e estruturas elevadas lateralmente carregadas*, Tese de Mestrado, UFRJ, 1974, Rio de Janeiro.

PITTA, J. F. A. *Ações Devido ao Vento em Edificações*. São Carlos: UfSCar, 2001. 47p. (Série Apontamentos)

PORTELA, G.; GODOY, L. A. Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a conical roof, *journal of constructional steel research*, v.61 p. 786 – 807, 2004.

SENTHOORAN, S.; LEE, D. D.; PARAMESWARAN, S. A computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.92, p. 1131-1145, 2004.

SHARMA, R. N.; RICHARDS, P. N. Net pressures on the roof of a low-rise building with wall openings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. No prelo.

SHKLAR, C.; ARBEL, A. Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.92, p.1039-1059, 2004.

SOARES FILHO, M. et al. Wind Pressures in Framed Structures with Semi-rigid Connections. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. V. XXVI, No. 2, p. 180-189, 2004.

TAKAHASHI, T. ET AL. 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, p. 155-169, 2005.

TIELEMAN, H. W. Wind Tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.91, p 1627-1649, 2003.

ANEXO A – COEFICIENTES S_1 , S_2 E S_3 PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO OBTIDOS DA NBR 6123 (ABNT, 1988)

- FATOR S_1

O fator S_1 é o fator topográfico que considera as variações de relevo de terreno no entorno da edificação. É determinado da seguinte forma:

- Terreno plano ou fracamente acidentado $\Rightarrow S_1=1$;
- Vales profundos protegidos de vento de qualquer direção $\Rightarrow S_1= 0,9$;
- Taludes e morros alongados, onde pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional soprando no sentido indicado na figura A1.

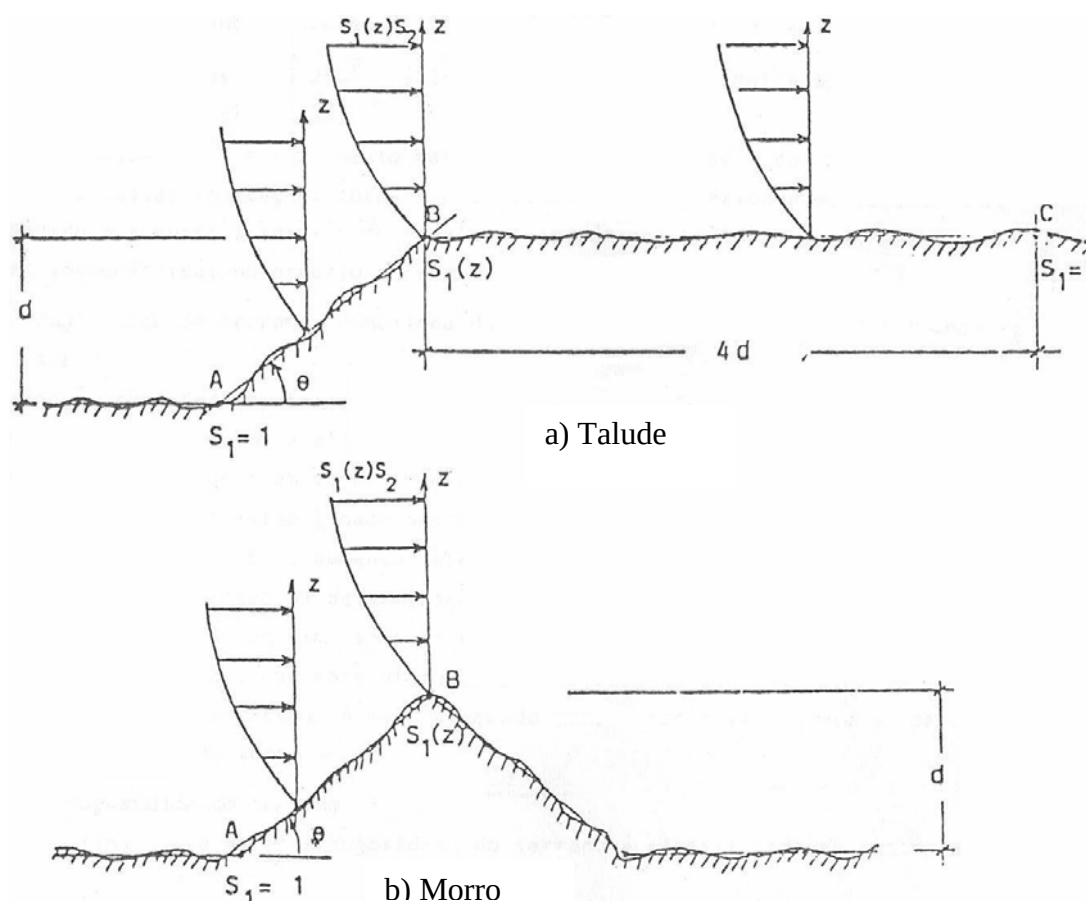


Figura A1 - Fator Topográfico $S_1(Z)$

O fator S_1 será função da declividade conforme a posição relativa da edificação:

No ponto A (morros) e A e C (taludes) $\Rightarrow S_1=1$

No ponto B (S_1 é uma função $S_1(z)$ em que z é a altura da edificação):

$$\theta=3^\circ \Rightarrow S_1=1$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ \Rightarrow S_1 = 1 + \left(2,5 - \frac{z}{d} \right) \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$$

$$\theta \geq 45^\circ \Rightarrow S_1=1$$

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

$z \Rightarrow$ altura média a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

$d \Rightarrow$ diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

$\theta \Rightarrow$ Inclinação média do talude ou encosta do morro.

Maior confiança pode ser obtida na adoção desse coeficiente, por medidas anemométricas no próprio local. Em caso de terrenos de relevo mais complexos recomenda-se o ensaio de modelos topográficos em túnel de vento.

- FATOR S_2

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte dela.

a) Rugosidade do Terreno

A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias:

Categoria I – Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medidas na direção e sentido do vento incidente (mar calmo¹, lagos e rios, pântanos sem vegetação);

¹ Para mar agitado, o valor do expoente p para uma hora pode chegar a 0,15 em ventos violentos. Em geral $p \approx 0,12$.

- **Categoria II** – Terreno aberto, em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas (zonas costeiras planas, pradarias, campos de aviação, fazendas sem sebes ou muros), sendo que a cota média do topo dos obstáculos é menor ou igual a 1 metro;
- **Categoria III** – Terrenos planos ou ondulados com obstruções, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas (granjas e casas de campo com exceção das partes com matas, subúrbios a considerável distância do centro). A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3 metros;
- **Categoria IV** – Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zonas florestal, industrial ou urbanizada (zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades e áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 metros);
- **Categoria V** – Terrenos coberto por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados (florestas com árvores altas de copas isoladas, centros de grandes cidades e complexos industriais bem desenvolvidos), com cota média do topo dos obstáculos igual ou superior a 25 metros.

Podem ser consideradas categorias intermediárias interpolando-se convenientemente os valores de p e b ou de S_2 como indicado no anexo B.

b) Dimensões da Edificação

Segundo a NBR 6123:1988, foi verificado que o intervalo de tempo mais curto das medidas usuais (3 segundos) corresponde a rajadas cujas dimensões envolvem convenientemente obstáculos de até 20 metros na direção do vento médio.

Quanto maior o intervalo de tempo usado no cálculo da velocidade média, maior a distância abrangida pela rajada; por outro lado, quanto menor esse intervalo, maior a velocidade média da rajada.

Quando se deseja analisar partes da edificação é necessário verificar as características estruturais, verificando se há ou não continuidade entre os elementos de vedação. Uma junta de dilatação normalmente separa a estrutura em duas partes independentes. Estruturas cujo esqueleto é constituído por estruturas planas, que não possuem elementos capazes de redistribuir os esforços transversais pelas mesmas, devem ser analisados como se a dimensão transversal dessa edificação fosse igual ao afastamento entre dois elementos estruturais consecutivos.

A NBR 6123:1988 classifica as partes de edificações e seus elementos em 3 classes com intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de 3, 5 e 10 segundos, correspondendo as classes A, B, C:

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

No anexo B obtido da NBR 6123:1988, indica como determinar o intervalo de tempo correspondente para edificações, ou parte de edificações, onde a maior direção horizontal ou vertical exceda 80 metros.

c) Altura Sobre o Terreno

O fator S_2 usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtida pela seguinte expressão:

$$S_2 = b.Fr.\left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (5)$$

onde:

$z \Rightarrow$ altura acima do nível geral do terreno, limitado a altura gradiente (z_g) que define o contorno superior da camada atmosférica;

$Fr \Rightarrow$ fator de rajada, correspondente à categoria II, classe A;

$b \Rightarrow$ parâmetro meteorológico;

$p \Rightarrow$ função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo.

Os parâmetros utilizados para calcular S_2 para as cinco categorias citadas anteriormente são apresentados na Tabela A1, obtida da NBR 6123:1988.

Tabela A1 - Parâmetros Meteorológicos para Definir S_2 . Fonte: NBR 6123:1988

Categoria	Zg (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,940	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Na Tabela A2 obtida da NBR 6123:1988 são dados os valores de S_2 para as diversas Categorias de rugosidade do terreno e Classes de dimensões das edificações.

O anexo B apresenta valores para intervalos de tempo entre 3 e 3600 segundos para as cinco categorias de rugosidade do terreno, obtidos da NBR 6123 (1988).

Tabela A2 - Fator S_2 . Fonte: NBR 6123 (ABNT,1988)

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

Para o caso de mudança de rugosidade do terreno, o fator S_2 pode ser calculado conforme o anexo C retirado do item 5.5 da NBR 6123 (ABNT, 1988).

- FATOR S_3

O fator estatístico S_3 considera o grau de segurança e a vida útil da estrutura. O nível de probabilidade de 63% e a vida útil de 50 anos são considerados

adequados para edificações normais destinadas à moradia, hotéis, escritórios e etc. (Grupo 2).

A Tabela abaixo apresentada pela NBR 6123 (ABNT,1988) indica os valores mínimos do fator S_3 em cinco Grupos.

Tabela A3 - Valores Mínimos do Fator Estatístico S_3 . Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988)

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 bombeiro 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	Vedação (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas do Grupo 1 a 3 durante a construção.	0,83

A determinação do fator S_3 para outros níveis de probabilidade e para outros períodos de exposição da edificação a ação do vento está indicada no Anexo D, conforme a NBR 6123 (ABNT,1988).

ANEXO B - VELOCIDADE NORMALIZADA S_2 E INTERVALO DE TEMPO

B-1 Fator S_2

O fator S_2 pode ser considerado como uma velocidade adimensional, normalizada em V_0 :

$$S_{2,i} = \frac{\bar{V}_{t,i}(z)}{V_0} \quad (b1)$$

onde :

i - categoria de rugosidade do terreno;

$\bar{V}_{t,i}(z)$ - velocidade média sobre t segundos, na altura z em cima do terreno, para a Categoria i (sem considerar o fator S_1 e S_3)

A velocidade característica $V_{k,i}$ é definida por:

$$V_{k,i} = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (b2)$$

Independente das categorias de rugosidade definidas na NBR 6123:1988, o fator S_2 pode ser obtido pela expressão:

$$S_2 = b \cdot F_{r,II} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (b3)$$

Valores dos parâmetros b, $F_{r,II}$ e p, para diversos intervalos de tempo e para as cinco Categorias dessa norma são apresentados na Tabela B1. Os valores correspondentes a S_2 são apresentados na Tabela B2.

Tabela B1 – Parâmetros b, p, F_{r,II}

Categoria	t(s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
I	b	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
	p	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
II	b	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	p	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16
	Fr	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
III	b	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85
	p	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20
IV	b	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,80	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68
	p	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25
V	b	0,74	0,73	0,71	0,69	0,69	0,67	0,64	0,62	0,58	0,53	0,50	0,44
	p	0,15	0,16	0,18	0,19	0,19	0,21	0,22	0,23	0,26	0,29	0,31	0,35

B –2. Intervalo de tempo

Para a determinação do intervalo de tempo, t, a usar na obtenção da velocidade média do vento que incide em uma edificação, ou parte de edificação, com a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal excedendo 80 metros, poderá ser utilizada a expressão:

$$t = \frac{7,5L}{V_t(h)} \quad (b4)$$

onde:

L – altura ou largura da superfície frontal da edificação ou parte de edificação em estudo, adotando-se o maior dos dois valores;

$V_t(h)$ – velocidade média do vento sobre t segundos, no topo da edificação ou da parte da edificação em estudo -- $V_t(h) = S_1 \cdot S_2(h) \cdot V_0$

O cálculo de $V_t(h)$ pode ser feito por aproximações sucessivas.

Tabela B2– Velocidade normalizada S_2

Cat.	z(m)	Valores de S_2 para t(s)=											
		3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
I	≤5	1,06	1,04	1,01	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76
	10	1,10	1,09	1,06	1,05	1,02	1,00	0,97	0,96	0,92	0,87	0,85	0,81
	15	1,13	1,12	1,09	1,08	1,05	1,03	1,01	0,99	0,95	0,91	0,88	0,85
	20	1,15	1,14	1,12	1,11	1,08	1,06	1,03	1,02	0,98	0,93	0,91	0,87
	30	1,17	1,17	1,15	1,14	1,11	1,09	1,07	1,05	1,01	0,97	0,94	0,91
	40	1,20	1,19	1,17	1,17	1,14	1,12	1,09	1,08	1,04	0,99	0,97	0,93
	50	1,21	1,21	1,19	1,19	1,16	1,14	1,11	1,10	1,06	1,02	0,99	0,95
	60	1,22	1,22	1,21	1,20	1,17	1,15	1,13	1,12	1,08	1,03	1,01	0,97
	80	1,25	1,24	1,23	1,23	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,06	1,03	1,00
	100	1,26	1,26	1,25	1,25	1,22	1,20	1,18	1,17	1,13	1,08	1,06	1,02
	120	1,28	1,28	1,27	1,27	1,24	1,22	1,20	1,19	1,15	1,10	1,07	1,04
	140	1,29	1,29	1,28	1,28	1,25	1,24	1,21	1,20	1,16	1,12	1,09	1,06
	160	1,30	1,30	1,29	1,29	1,26	1,25	1,23	1,21	1,18	1,13	1,10	1,07
	180	1,31	1,31	1,31	1,31	1,27	1,26	1,24	1,23	1,19	1,15	1,12	1,08
	200	1,32	1,32	1,32	1,32	1,28	1,27	1,25	1,24	1,20	1,16	1,13	1,10
	250	1,34	1,34	1,33	1,33	1,31	1,29	1,27	1,26	1,22	1,18	1,15	1,12
II	≤5	0,94	0,92	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77	0,75	0,70	0,65	0,62	0,58
	10	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
	15	1,04	1,02	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86	0,81	0,76	0,73	0,69
	20	1,06	1,04	1,02	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,85	0,80	0,77	0,72
	30	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	0,99	0,96	0,94	0,89	0,84	0,81	0,77
	40	1,13	1,11	1,09	1,08	1,05	1,02	0,99	0,98	0,93	0,88	0,85	0,81
	50	1,15	1,13	1,12	1,10	1,07	1,05	1,02	1,00	0,96	0,91	0,88	0,84
	60	1,16	1,15	1,14	1,12	1,10	1,07	1,04	1,03	0,98	0,93	0,90	0,87
	80	1,19	1,18	1,17	1,16	1,13	1,11	1,08	1,06	1,02	0,97	0,94	0,91
	100	1,22	1,21	1,20	1,18	1,16	1,13	1,11	1,09	1,05	1,01	0,97	0,94
	120	1,24	1,23	1,22	1,21	1,18	1,16	1,13	1,12	1,08	1,03	1,00	0,97
	140	1,25	1,24	1,24	1,23	1,20	1,18	1,15	1,14	1,10	1,06	1,03	0,99
	160	1,27	1,26	1,25	1,24	1,22	1,20	1,17	1,16	1,12	1,08	1,05	1,01
	180	1,28	1,27	1,27	1,26	1,24	1,21	1,19	1,18	1,14	1,09	1,06	1,03
	200	1,29	1,28	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,19	1,15	1,11	1,08	1,05
	250	1,31	1,31	1,31	1,30	1,28	1,26	1,24	1,23	1,19	1,15	1,12	1,09
	300	1,34	1,33	1,33	1,33	1,31	1,29	1,26	1,25	1,22	1,18	1,15	1,12
	≤5	0,88	0,86	0,82	0,78	0,75	0,72	0,68	0,67	0,61	0,55	0,52	0,48
	10	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,79	0,76	0,74	0,69	0,63	0,59	0,55

III	15	0,98	0,96	0,93	0,90	0,87	0,84	0,80	0,78	0,73	0,67	0,64	0,60
	20	1,01	0,99	0,96	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,71	0,67	0,63
	30	1,05	1,03	1,00	0,98	0,95	0,92	0,89	0,87	0,82	0,76	0,73	0,69
	40	1,08	1,06	1,04	1,02	0,99	0,96	0,92	0,91	0,86	0,80	0,77	0,73
	50	1,10	1,09	1,06	1,05	1,02	0,99	0,96	0,94	0,89	0,83	0,80	0,76
	60	1,12	1,11	1,09	1,07	1,05	1,02	0,98	0,97	0,91	0,86	0,83	0,79
	80	1,16	1,14	1,12	1,11	1,09	1,06	1,02	1,01	0,96	0,90	0,87	0,84
	100	1,18	1,17	1,15	1,14	1,12	1,09	1,06	1,04	0,99	0,94	0,91	0,88
	120	1,20	1,20	1,18	1,17	1,14	1,12	1,08	1,07	1,02	0,97	0,94	0,91
	140	1,22	1,22	1,20	1,19	1,17	1,15	1,11	1,10	1,05	0,99	0,97	0,94
	160	1,24	1,23	1,22	1,21	1,19	1,17	1,13	1,12	1,07	1,02	0,99	0,96
	180	1,26	1,25	1,23	1,23	1,21	1,19	1,15	1,14	1,09	1,04	1,01	0,98
	200	1,27	1,26	1,25	1,24	1,22	1,20	1,17	1,16	1,11	1,06	1,03	1,01
	250	1,30	1,29	1,28	1,28	1,26	1,24	1,21	1,20	1,15	1,10	1,08	1,05
	300	1,32	1,32	1,31	1,31	1,29	1,27	1,24	1,23	1,18	1,14	1,11	1,09
	350	1,34	1,34	1,33	1,33	1,31	1,30	1,27	1,26	1,21	1,17	1,15	1,12
IV	≤5	0,79	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64	0,60	0,57	0,51	0,45	0,42	0,37
	10	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,67	0,65	0,59	0,53	0,49	0,44
	15	0,90	0,88	0,84	0,82	0,79	0,76	0,72	0,70	0,63	0,57	0,54	0,49
	20	0,93	0,91	0,88	0,85	0,83	0,80	0,76	0,73	0,67	0,61	0,57	0,53
	30	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,85	0,81	0,79	0,73	0,67	0,63	0,58
	40	1,01	0,99	0,96	0,94	0,92	0,89	0,85	0,83	0,77	0,71	0,67	0,62
	50	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,92	0,88	0,86	0,80	0,74	0,71	0,66
	60	1,07	1,04	1,02	1,00	0,98	0,95	0,91	0,89	0,83	0,77	0,74	0,69
	80	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	0,99	0,96	0,93	0,88	0,82	0,79	0,74
	100	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,03	0,99	0,97	0,92	0,86	0,83	0,78
	120	1,16	1,14	1,12	1,11	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,90	0,87	0,82
	140	1,18	1,16	1,14	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	0,98	0,93	0,90	0,85
	160	1,20	1,18	1,16	1,15	1,13	1,11	1,08	1,05	1,00	0,95	0,93	0,88
	180	1,22	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,10	1,07	1,03	0,98	0,95	0,91
	200	1,23	1,21	1,20	1,19	1,17	1,15	1,12	1,09	1,05	1,00	0,97	0,93
	250	1,27	1,25	1,23	1,23	1,21	1,19	1,16	1,14	1,10	1,05	1,03	0,99
	300	1,29	1,27	1,26	1,26	1,24	1,23	1,20	1,17	1,13	1,09	1,07	1,03
	350	1,32	1,30	1,29	1,29	1,27	1,26	1,23	1,21	1,17	1,13	1,11	1,07
	400	1,34	1,32	1,32	1,32	1,30	1,29	1,26	1,24	1,20	1,16	1,14	1,10
	420	1,35	1,33	1,33	1,33	1,31	1,30	1,27	1,25	1,21	1,17	1,16	1,12
	≤01	0,74	0,72	0,67	0,65	0,62	0,58	0,54	0,51	0,45	0,38	0,34	0,29
	15	0,79	0,76	0,72	0,70	0,67	0,63	0,59	0,56	0,50	0,43	0,39	0,33

V	20	0,82	0,80	0,76	0,74	0,71	0,67	0,63	0,60	0,53	0,46	0,43	0,36
	30	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,73	0,69	0,65	0,59	0,52	0,48	0,42
	40	0,91	0,89	0,86	0,84	0,81	0,77	0,73	0,70	0,64	0,57	0,53	0,46
	50	0,94	0,93	0,89	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74	0,67	0,60	0,57	0,50
	60	0,97	0,95	0,92	0,91	0,87	0,84	0,80	0,77	0,71	0,64	0,60	0,54
	80	1,01	1,00	0,97	0,96	0,92	0,89	0,85	0,82	0,76	0,69	0,66	0,59
	100	1,05	1,03	1,01	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,80	0,74	0,70	0,64
	120	1,07	1,06	1,04	1,03	1,00	0,97	0,93	0,90	0,84	0,77	0,75	0,68
	140	1,10	1,09	1,07	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,88	0,81	0,78	0,72
	160	1,12	1,11	1,10	1,09	1,05	1,03	0,99	0,96	0,91	0,84	0,81	0,75
	180	1,14	1,14	1,12	1,11	1,08	1,05	1,02	0,99	0,93	0,87	0,84	0,79
	200	1,16	1,16	1,14	1,13	1,10	1,08	1,04	1,01	0,96	0,90	0,87	0,82
	250	1,20	1,20	1,18	1,18	1,15	1,13	1,09	1,07	1,01	0,96	0,94	0,88
	300	1,23	1,23	1,22	1,22	1,19	1,17	1,14	1,11	1,06	1,01	0,99	0,94
	350	1,26	1,26	1,26	1,26	1,22	1,12	1,18	1,15	1,11	1,05	1,04	0,99
	400	1,29	1,29	1,29	1,29	1,25	1,24	1,21	1,19	1,14	1,09	1,08	1,04
	450	1,32	1,32	1,32	1,32	1,28	1,27	1,24	1,22	1,18	1,13	1,12	1,08
	500	1,34	1,34	1,34	1,34	1,31	1,30	1,27	1,25	1,21	1,17	1,16	1,12

ANEXO C – MUDANÇA DE RUGOSIDADE DO TERRENO

Segundo a NBR 6123: 1988, quando o comprimento de rugosidade passa de z_{01} para z_{02} , o vento percorre uma certa distância antes que se estabeleça plenamente um novo perfil de velocidade média, com altura z_g . A alteração do perfil começa próxima ao solo e o novo perfil aumenta sua altura z_x à medida que cresce a distância x medida a partir da linha de mudança de Categoria. Esse perfil de velocidade média é determinado do seguinte modo:

C.1 – Transição para Categoria de Rugosidade maior ($z_{01} < z_{02}$)

As alturas z_x e z_i são determinadas pelas expressões:

$$z_x = Az_{02} \left(\frac{x}{z_{02}} \right)^{0,8} \quad (c1)$$

$$z_i = 0,36z_{02} \left(\frac{x}{z_{02}} \right)^{0,75} \quad (c2)$$

onde:

$$A = 0,63 - 0,03 \ln \left(\frac{z_{02}}{z_{01}} \right) \quad (c3)$$

O perfil de velocidades médias (fatores S_2) é assim definido (Figura C-a):
da altura z_x para cima são considerados os fatores S_2 correspondentes ao terreno mais afastado da edificação (z_{01});
da altura z_i para baixo são considerados os fatores S_2 correspondentes ao terreno que circunda a edificação (z_{02});
na zona de transição entre z_i e z_x considerar uma variação linear do fator S_2 .

C.2 – Transição para Categoria de Rugosidade menor ($z_{01} > z_{02}$)

A altura z_x é determinada pela expressão:

$$z_x = Az_{02} \left(\frac{x}{z_{02}} \right)^{0,8} \quad (c4)$$

onde:

$$A = 0,73 - 0,03 \ln \left(\frac{z_{01}}{z_{02}} \right) \quad (c5)$$

O perfil de velocidades médias (fatores S_2) é assim definido (Figura C-b):
da altura z_x para cima são considerados os fatores S_2 correspondentes ao terreno mais afastado da edificação (z_{01});

da altura z_x para baixo são considerados os fatores S_2 correspondentes ao terreno que circunda a edificação, porem sem ultrapassar o valor de S_2 determinado na altura z_x para o terreno de rugosidade z_{01} citado anteriormente;

As alturas das camadas limite, z_g , nos perfis de velocidade média plenamente desenvolvidos e os comprimentos de rugosidade são dados na Tabela C1:

Tabela C1 – Altura das camadas limites para cada categoria

Categoria	I	II	III	IV	V
z_g (m)	250	300	350	420	500
z_o (m)	0,005	0,07	0,3	1,0	2,5

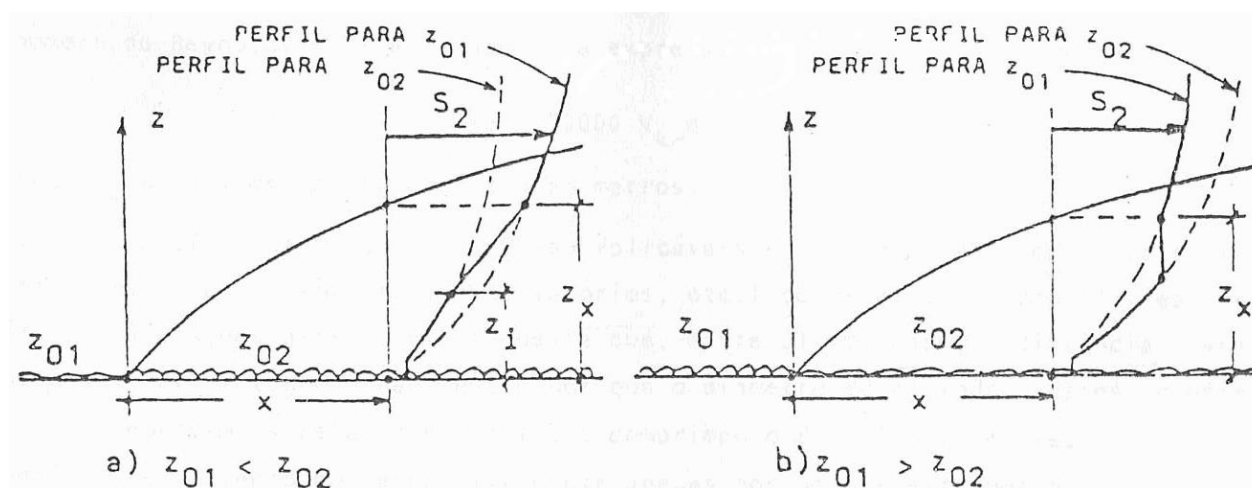


Figura C1 – Perfil de S_2 a sotavento de uma mudança de rugosidade

ANEXO D – FATOR ESTATÍSTICO S_3 PARA A PROBABILIDADE $P_{m,m}$ E VIDA ÚTIL DE EDIFICAÇÃO DE m ANOS

Seja V_0^+ a velocidade do vento que tem uma probabilidade P_m de ser excedida, no local em consideração, pelo menos uma vez em um período de m anos. Esta velocidade corresponde a rajadas de três segundos de duração, nas condições da Categoria de rugosidade II, na altura de 10 metros acima do terreno. A relação entre V_0^+ e a velocidade básica é a seguinte:

$$V_0^+ = S_3 V_0$$

Na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações, ou de indicações correspondentes na norma estrutural, cabe ao projetista fixar a probabilidade P_m e a vida útil m de acordo com as características da edificação.

A TABELA D1 apresenta valores típicos de fator S_3 , cuja expressão matemática é:

$$S_3 = 0,54 \left[-\frac{\ln(1-P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad (d1)$$

Tabela D1 – Fator estatístico S_3

m	Valores de S_3 para $P_m =$					
	0,10	0,20	0,50	0,63	0,75	0,90
2	0,86	0,76	0,64	0,60	0,57	0,53
20	1,10	0,98	0,82	0,78	0,74	0,68
25	1,27	1,13	0,95	0,90	0,85	0,79
50	1,42	1,26	1,06	1,00	0,95	0,88
100	1,58	1,41	1,18	1,11	1,06	0,98
200	1,77	1,57	1,31	1,24	1,18	1,09

Em nenhum caso pode ser adotado um fator estatístico S_3 menor que o indicado na Tabela A3.

ANEXO E – GRÁFICO DE ISOPLETAS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO E PARA TODO O TERRITÓRIO NACIONAL

A velocidade básica do vento V_0 (velocidade de uma rajada de 3 segundos), a 10 metros acima do terreno em campo aberto e plano, que pode ser excedida uma vez a cada 50 anos com uma probabilidade de 63% pode ser obtida através do gráfico de isopletas (gráfico de curvas de igual velocidade do vento) ilustrados na figura E1 e E2.

Na falta de dados confiáveis adotou-se a menor velocidade básica possível (30m/s) a favor da segurança, em toda a área hachurada do mapa.

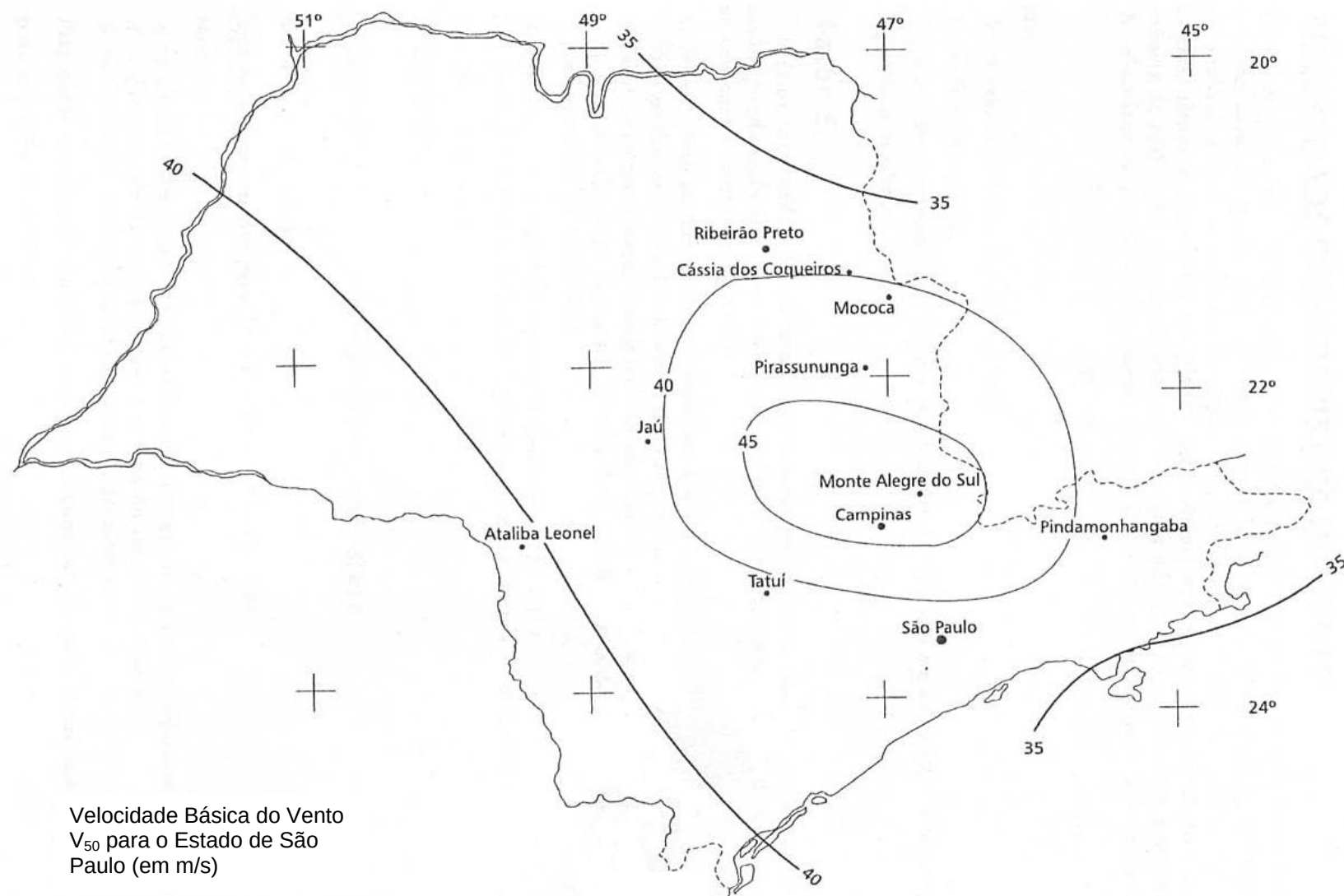


Figura E1 - Gráfico das Isopletas da Velocidade Básica do Vento Em m/s para o Estado de São Paulo

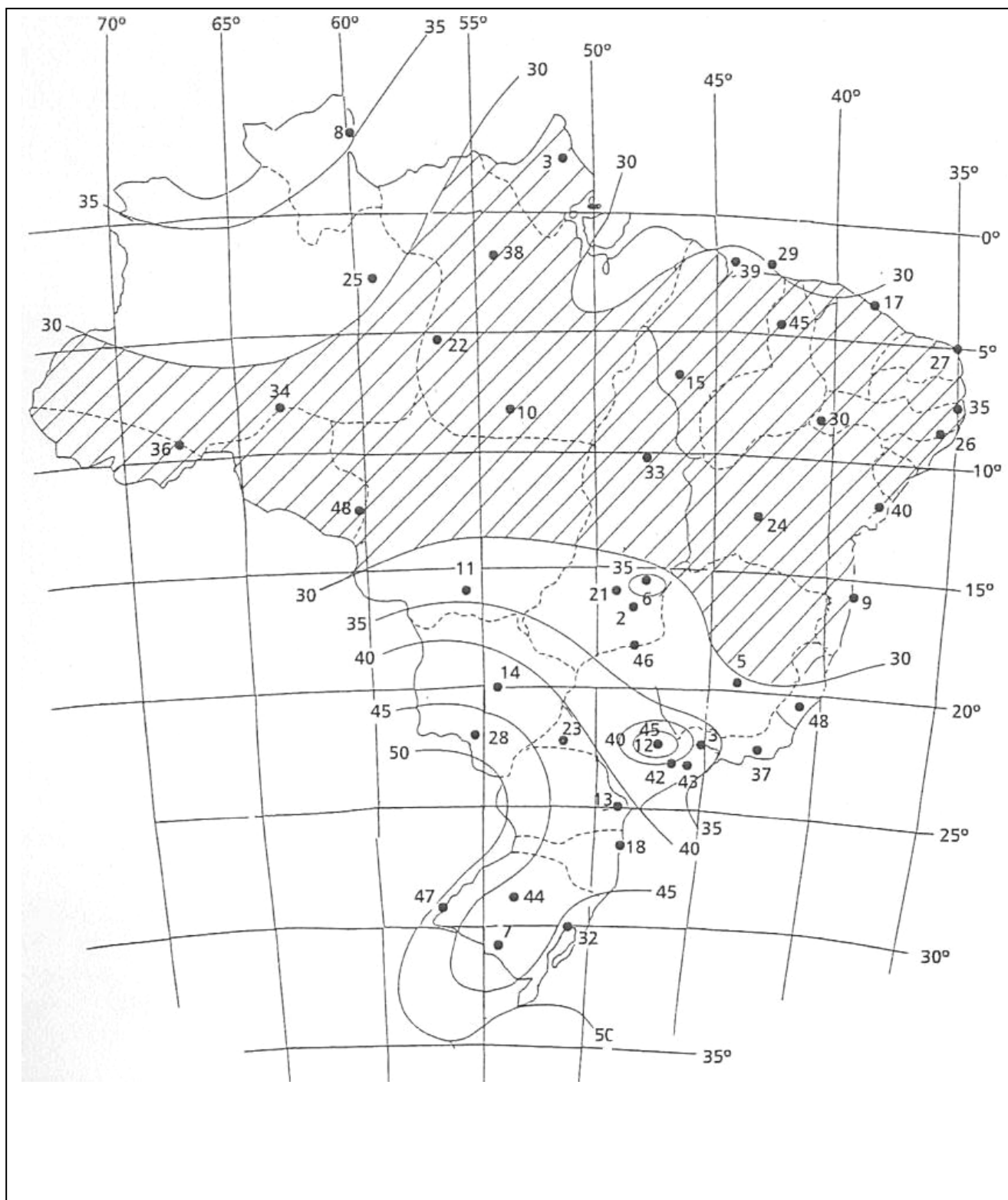
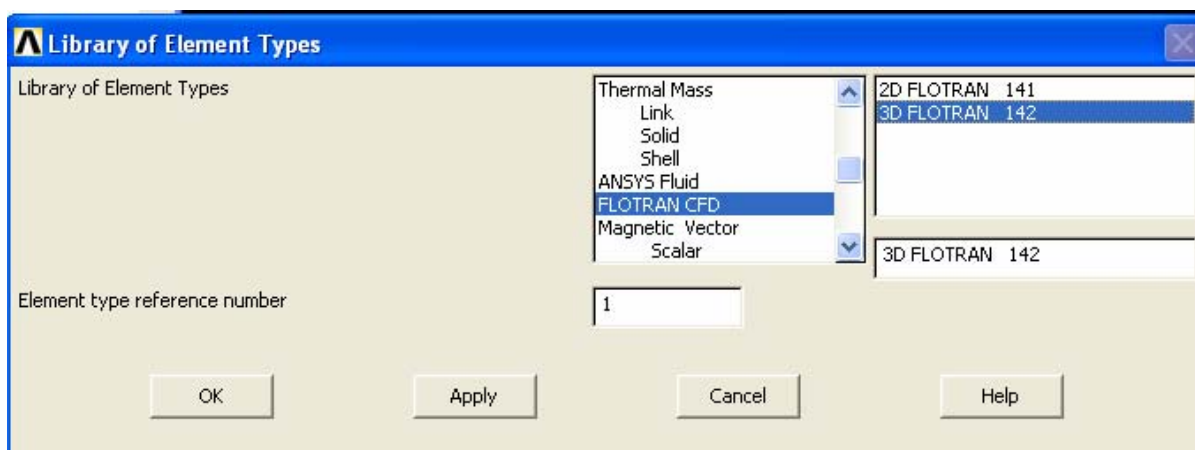


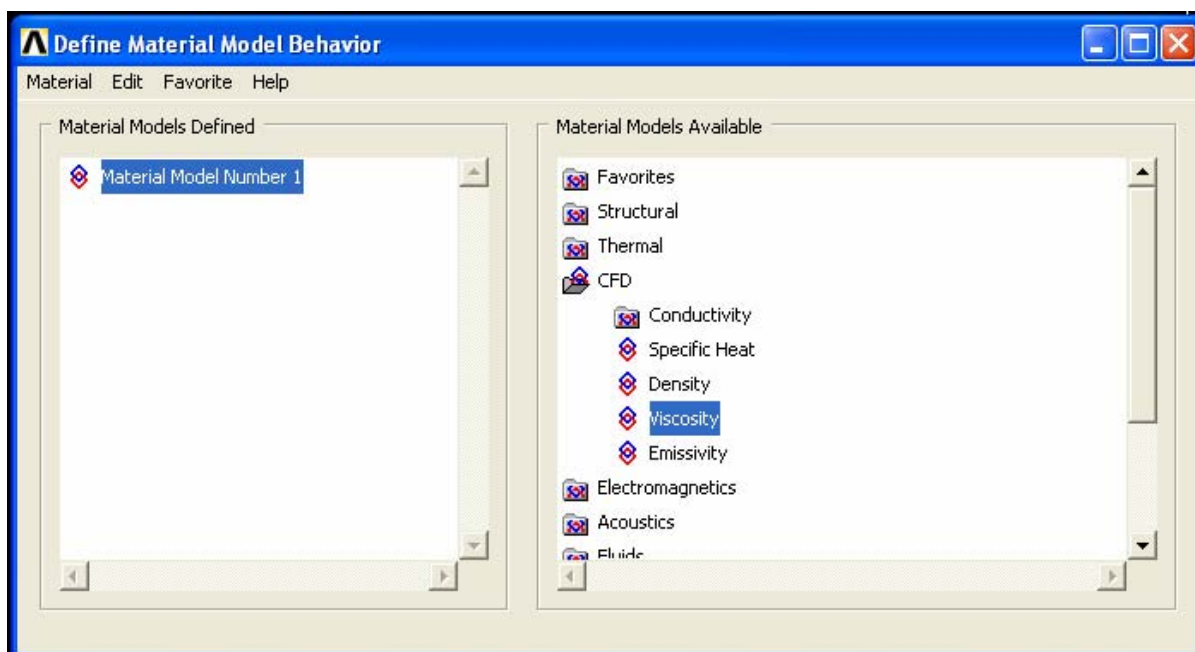
Figura E2- Gráfico de Isopletas da Velocidade Básica do Vento Em m/s

ANEXO F – TUTORIAL DE TODOS OS PASSOS EXECUTADOS PARA A ELABORAÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.

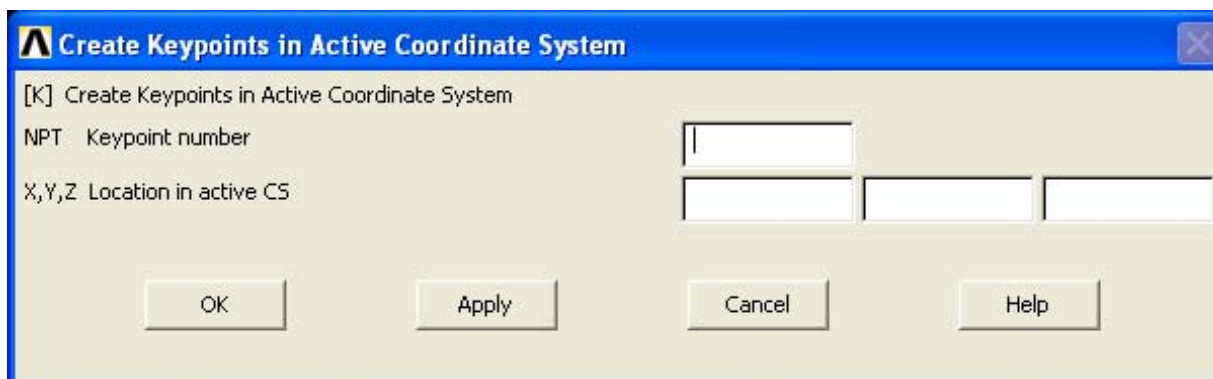
Criar tipo de elemento: preprocessor/element type/ add/edit/delete e selecionar o elemento flotran CFD (3D flotran 142)



Propriedade dos materiais: preprocessor/ material props/ material models, clicar em CFD e adicionar os valores das características dos fluidos (densidade, viscosidade e se necessário, condutividade, calor específico e emissividade).

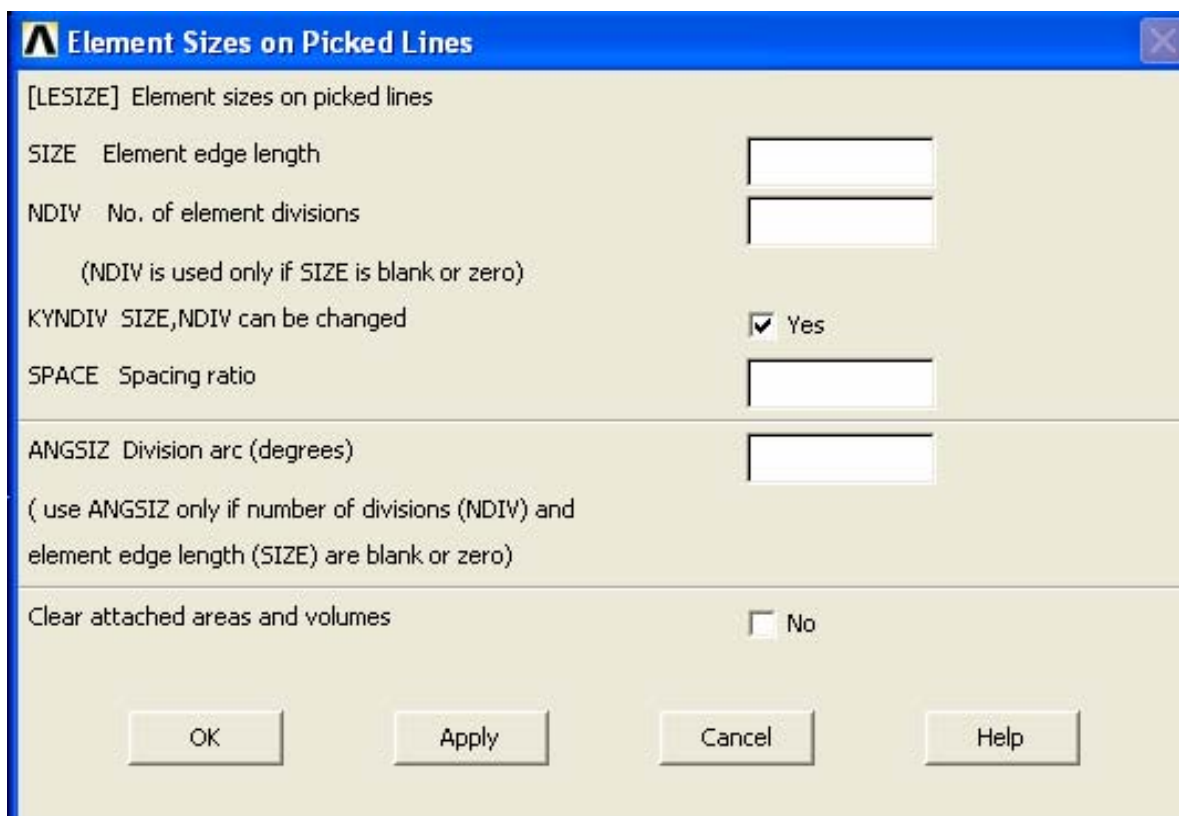


Definição do modelo: Primeiramente criam-se os pontos através de preprocessor/ modeling/ create/keypoints/in active CS dando o número dos pontos e as suas coordenadas.



Em seguida criam-se as linhas através de preprocessor/ modeling/ create/ lines/ lines/ in active coord unindo-se os pontos. Depois criam-se as áreas através de preprocessor/ modeling/ create/ areas/arbitrary/ by lines unindo-se as linhas e formando áreas. Em seguida cria-se o volume de controle e o volume da edificação unindo-se suas áreas. Através das operações booleanas (preprocessor/ modeling/ operate booleans) subtraia o volume da edificação, do volume de controle.

Definição da malha: preprocessor/ meshing/ size cntrls/ manual size/ lines (all lines ou picked lines) e definir o número de divisões ou o tamanho do elemento.



Atribuição da malha: preprocessor/ meshing/ mesh/ volume/ free.



Características da análise flotran: preprocessor/ flotran set up/ solution options e habilitar a turbulência.

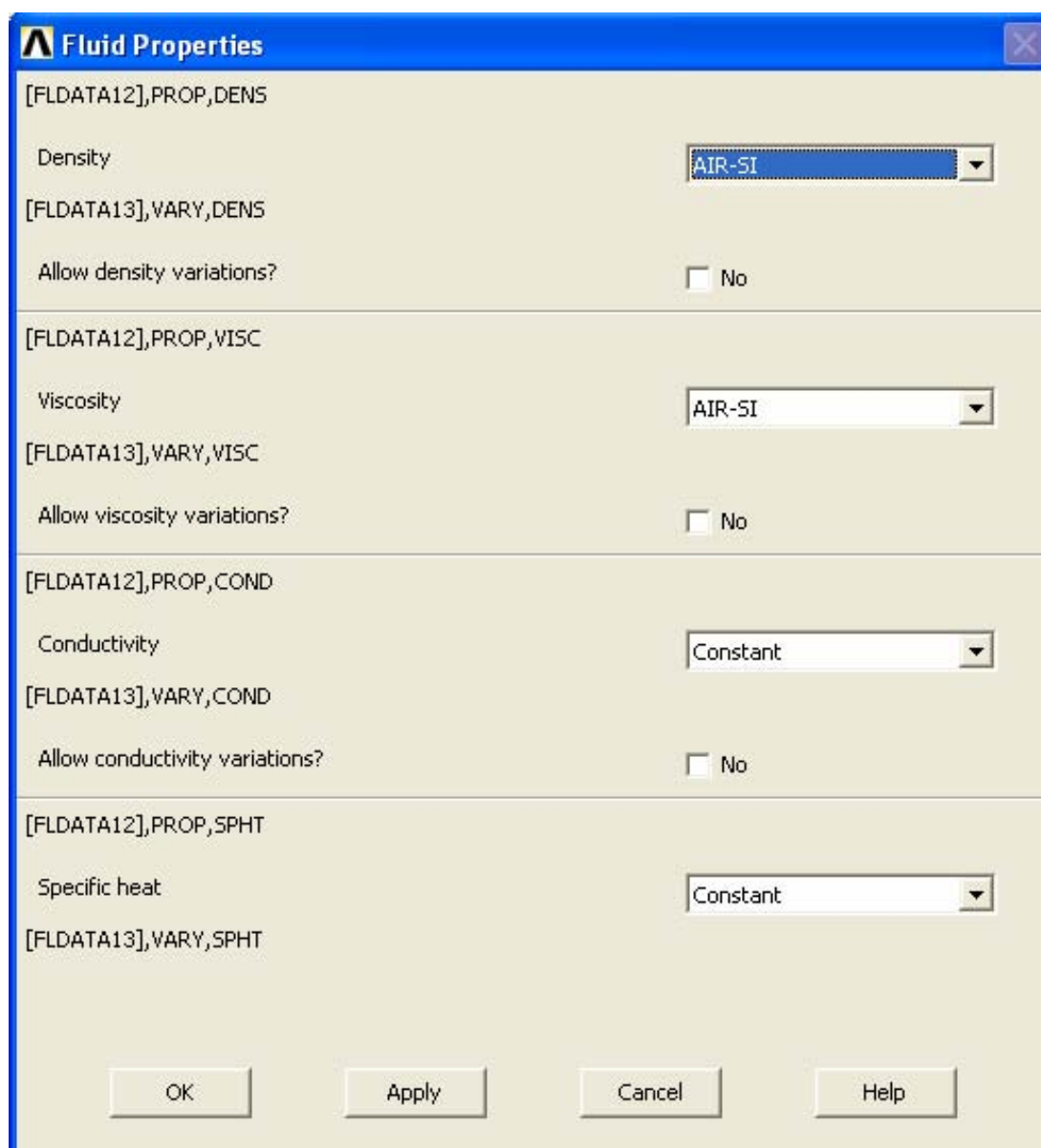
FLOTRAN Solution Options

[FLDATA1], SOLU

TRAN	Steady state or transient?	Steady State
FLOW	Solve flow equations?	☒ Yes
TEMP	Adiabatic or thermal?	Adiabatic
TURB	Laminar or turbulent?	Turbulent
COMP	Incompress or compress?	Incompressible
VOF	Activate VOF advection?	☐ No
SFTS	Surface tension effect?	☐ No
IVSH	Incompress viscous heat?	☐ No
SWRL	Axisymmetric with swirl?	☐ No
SPEC	Multiple species transport	☐ No
ALE	Allow mesh motion ?	☐ No
RDSF	Solve radiosity equation ?	☒ Yes

OK Apply Cancel Help

Dar as propriedades do fluido: preprocessor/ flotran set up/ fluid properties e colocar para a densidade, e viscosidade, air-SI.



The image shows a 'Fluid Properties' dialog box with a blue title bar and a close button. It is divided into four sections, each with a label on the left and a dropdown menu on the right. The first section is for Density, with a label '[FLDATA12],PROP,DENS' and a dropdown showing 'AIR-SI'. Below it is a checkbox 'Allow density variations?' with 'No' selected. The second section is for Viscosity, with a label '[FLDATA12],PROP,VISC' and a dropdown showing 'AIR-SI'. Below it is a checkbox 'Allow viscosity variations?' with 'No' selected. The third section is for Conductivity, with a label '[FLDATA12],PROP,COND' and a dropdown showing 'Constant'. Below it is a checkbox 'Allow conductivity variations?' with 'No' selected. The fourth section is for Specific heat, with a label '[FLDATA12],PROP,SPHT' and a dropdown showing 'Constant'. Below it is a checkbox 'Allow specific heat variations?' with 'No' selected. At the bottom are four buttons: 'OK', 'Apply', 'Cancel', and 'Help'.

Fluid Properties

[FLDATA12],PROP,DENS

Density AIR-SI

[FLDATA13],VARY,DENS

Allow density variations? ☐ No

[FLDATA12],PROP,VISC

Viscosity AIR-SI

[FLDATA13],VARY,VISC

Allow viscosity variations? ☐ No

[FLDATA12],PROP,COND

Conductivity Constant

[FLDATA13],VARY,COND

Allow conductivity variations? ☐ No

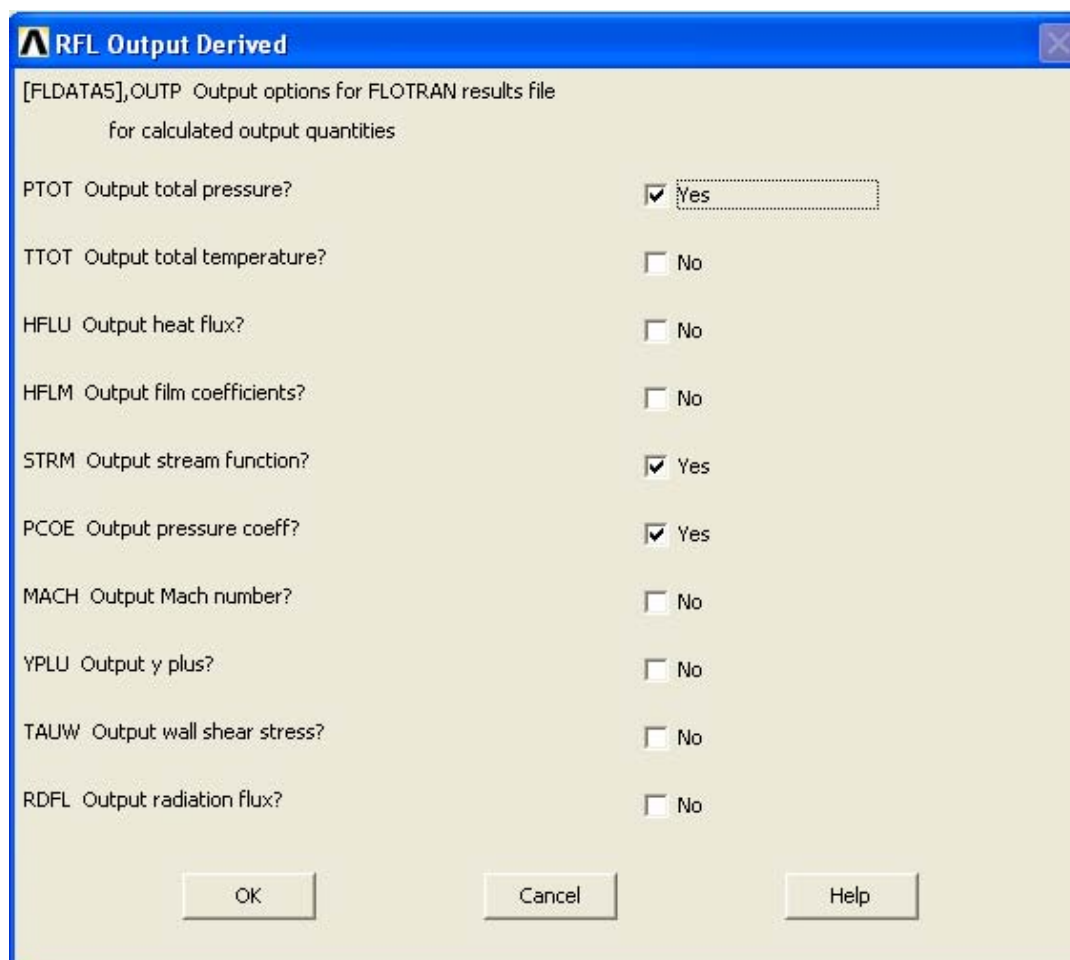
[FLDATA12],PROP,SPHT

Specific heat Constant

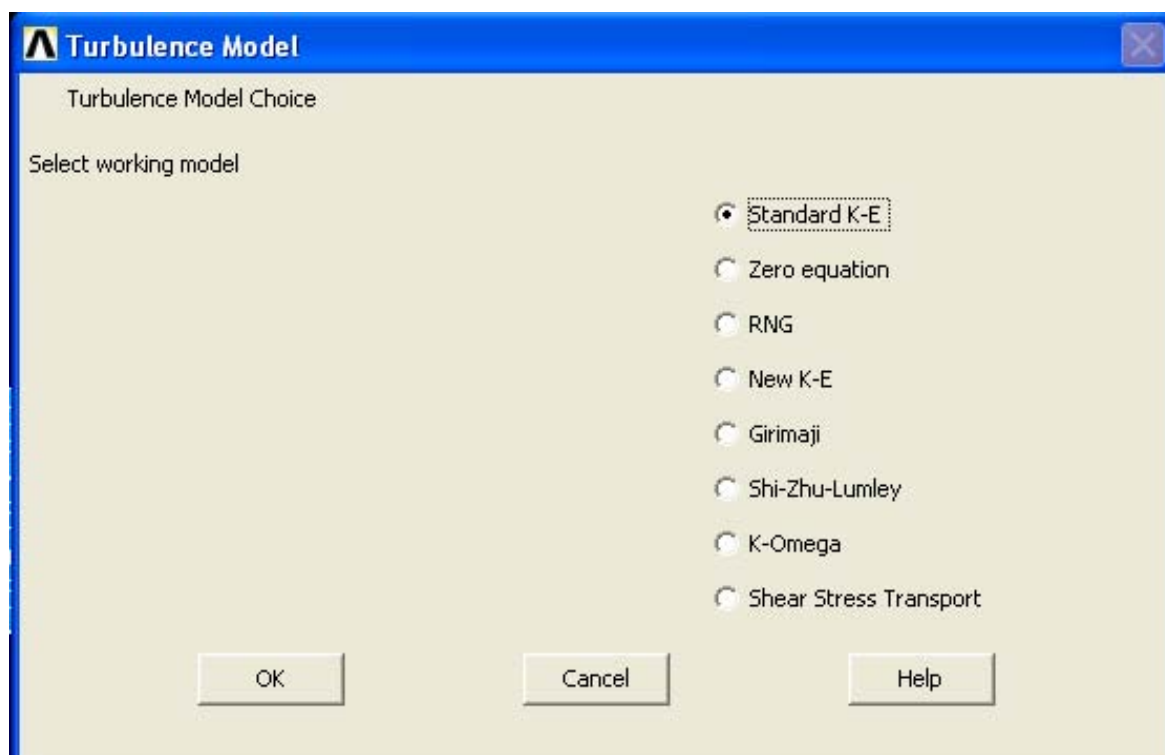
[FLDATA13],VARY,SPHT

OK Apply Cancel Help

Habilitar coeficientes de pressão: preprocessor/ flotran set up/additional out/ RFL out derived e habilitar o coeficiente de pressão (pcoe).



Escolher o modelo de turbulência: preprocessor/ flotran set up/ turbulence/ turbulence model/ e escolher Standard k-e.



Adicionar as ações: preprocessor/ loads/ define loads/ apply/ fluid/CFD e colocar as velocidades e pressões. Resolver a solução: solution/ run flotrán

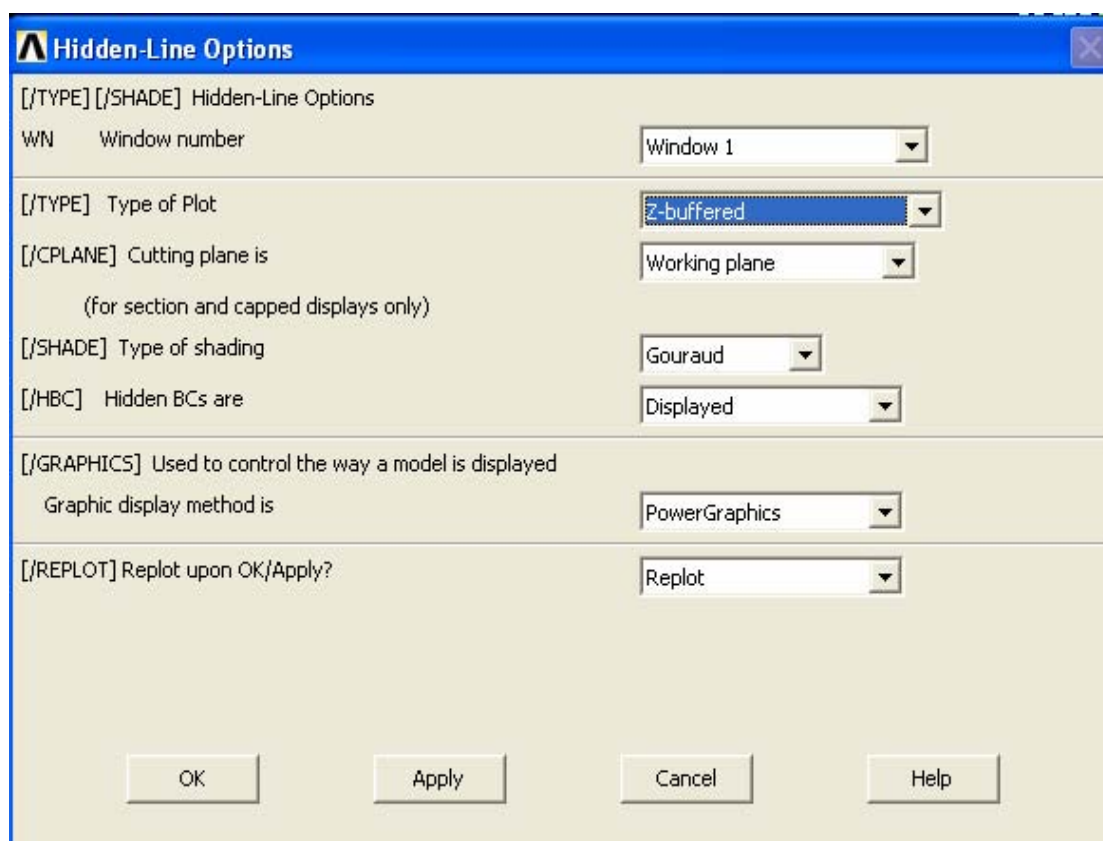
The dialog box is titled "Apply VELO load on areas". It contains the following fields and options:

- [DA] Apply Velocity Constraints on areas
- Apply VX load as a: Constant value (dropdown)
- If Constant value then: VX Load value: [text box]
- Apply VY load as a: Constant value (dropdown)
- If Constant value then: VY a Load value: [text box]
- Apply VZ load as a: Constant value (dropdown)
- If Constant value then: VZ Load value: [text box]
- Apply to boundary lines?: ☒ Yes
- Moving wall?: ☐ No
- Generalized Symmetry?: ☐ No
- NOTE: Blank values not interpreted as 0's !!!
- Buttons: OK, Cancel, Help

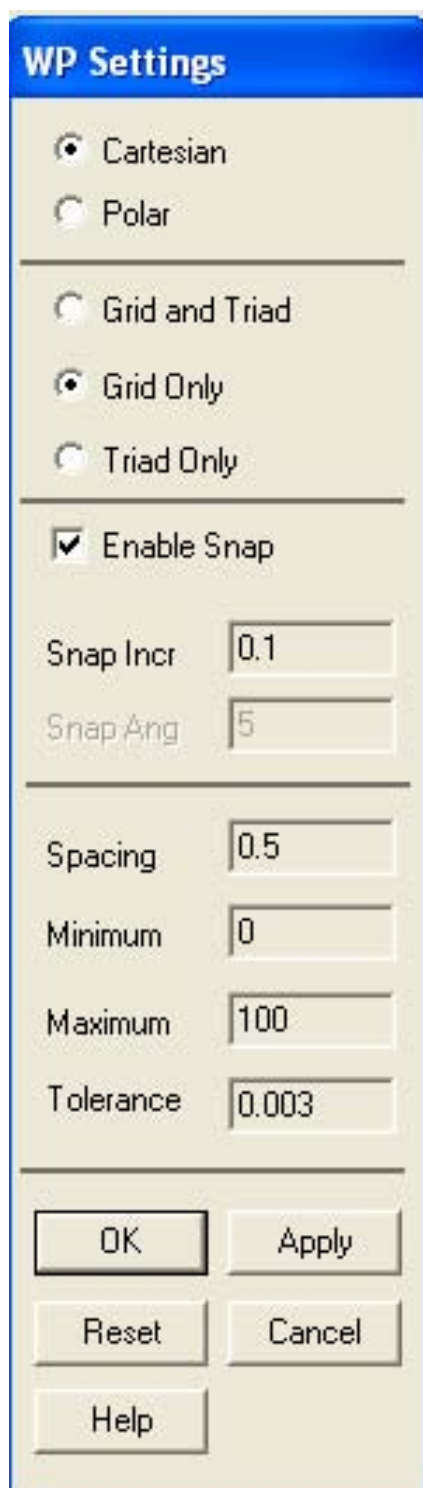
The dialog box is titled "Apply PRES on areas". It contains the following fields and options:

- [DA] Apply PRES on areas as a: Constant value (dropdown)
- If Constant value then: PRES Pressure value: [text box]
- Apply to boundary lines?: ☒ Yes
- Buttons: OK, Apply, Cancel, Help

Definir o plano onde se deseja obter os coeficientes de pressão: Ir em plotctrls/ style/ hidden line options e na caixa onde está o type of plot (z- buffered), colocar Q-slice z buffer).



Depois ir em work plane/ WP settings e habilitar grid only e definir os outros parâmetros de incremento, espaçamento e etc. Depois ir em workplane offset wp by increments e definir o plano.



The image shows a 'WP Settings' dialog box with a blue title bar. It contains several sections of settings. The first section has radio buttons for 'Cartesian' (selected) and 'Polar'. The second section has radio buttons for 'Grid and Triad', 'Grid Only' (selected), and 'Triad Only'. The third section has a checked checkbox for 'Enable Snap'. Below this are input fields for 'Snap Incr' (0.1) and 'Snap Ang' (5). The fourth section has input fields for 'Spacing' (0.5), 'Minimum' (0), 'Maximum' (100), and 'Tolerance' (0.003). At the bottom are buttons for 'OK', 'Apply', 'Reset', 'Cancel', and 'Help'.

WP Settings

☒ Cartesian
☐ Polar

☐ Grid and Triad
☒ Grid Only
☐ Triad Only

☒ Enable Snap

Snap Incr
Snap Ang

Spacing
Minimum
Maximum
Tolerance

Análise das soluções: general postproc/ read results/ last set ou by pick depois ir em plot results/ contour plot/ nodal solution e clicar na opção que deseja analisar.

