



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

**ESTUDO NUMÉRICO PARA A DETERMINAÇÃO DAS
PRESSÕES DEVIDAS A AÇÃO DO VENTO EM TORRES
METÁLICAS DE SEÇÃO CIRCULAR**

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 Fernando Henrique Carrera

Orientador: Prof. Dr. Renato Bertolino Jr

Ilha Solteira, SP, Agosto de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

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

C314e Carrera, Fernando Henrique
Estudo numérico para a determinação das pressões devidas a ação do vento em torres metálicas de seção circular / Fernando Henrique Carrera. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2007
148 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2007

Orientador: Renato Bertolino Jr.
Bibliografia: p. 132-133

1. Pressão do vento. 2. Coeficiente de pressão. 3. Torres. 4. Interação fluido-estrutura.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo Numérico para a Determinação das Pressões Devidas a Ação do Vento em Torres Metálicas de Seção Circular

AUTOR: FERNANDO HENRIQUE CARRERA
ORIENTADOR: Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JÚNIOR
DATA DA REALIZAÇÃO: 13 DE AGOSTO DE 2007.

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

Prof. Dr. **RENATO BERTOLINO JÚNIOR** - Presidente
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira

Prof. Dr. **HAROLDO DE MAYO BERNARDES**
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira

Prof. Dr. **JOÃO ALBERTO VENEGAS REQUENA**
Departamento de Estruturas / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

AGRADECIMENTOS

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.

À Universidade Estadual Paulista por colocar à 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, pois sem a força deles não conseguiria concluir este trabalho.

Um agradecimento especial a minha avó, Catarina Carreira Ramos, que sempre me deu força para que não desistisse.

A minha namorada por confiar em mim nesta jornada de trabalho.

A minha tia Catarina Carrera Rigate quem sempre me ajudou nesta jornada de trabalho.

A meus pais Pedro Rigati Carrera e Alice Ferracine Carrera

E principalmente a Deus por ter me dado fé e coragem nos momentos difíceis.

RESUMO

CARRERA (2007). Estudo numérico para a determinação das pressões devidas a ação do vento em torres metálicas de seção circular. Ilha Solteira, 2007. 147p. 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 a ação do vento e seus respectivos coeficientes de pressões de formas externos em torres de seção circular. As distribuições de pressões nas torres 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 da torre foi modelada tridimensionalmente, considerando como fluido o ar no qual a edificação está inserida. As distribuições de pressão foram determinadas para relações geométricas em planta da torre, entre a altura e o diâmetro (h/d), para valores menores ou iguais a 10. Posteriormente, comparam-se os resultados numéricos obtidos na simulação através do ANSYS com os valores apresentados pela norma NBR-6123:1988, a fim de verificar a viabilidade da utilização da simulação numérica na obtenção das distribuições de pressão em outras estruturas.

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

ABSTRACT

CARRERA, F.H. (2007). Numeric study for the determination of the wind pressures on the wind actions in steel tower with circular section. Dissertation (Mastering). Unesp – Paulista State University, Ilha Solteira.

The present work has for objective to obtain the distributions pressures values the wind actions in tower with circular section. The values of the distributions pressures are obtained to the numeric simulation, using the ANSYS 9.0 software and considering the flow structure interaction. In the numeric simulation, the tower geometry was considered in 3D dimension, and the flowed it is the air. The distributions pressures were certain for geometry relationships between the height and the diameter (h/d), for values smaller or equal than 10.

Later, the ANSYS numeric results are compared with the presents values by the NBR 6123:1998, in order to verify the viability numeric simulation used for obtaining the pressures distributions in other structures.

Key- words: static analysis, wind, velocity, pressures, tower, flow – structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Túnel do Vento Prof. Joaquim Blessmann.....	24
Figura 2 – Modelo Reduzido do Edifício no Interior do Túnel do Vento.....	25
Figura 3 – Modelo Reduzido do Edifício e sua Vizinhança no Interior do Túnel do Vento.....	26
Figura 4 – Modelo Reduzido de uma Torre de Seção Triangular no Interior do Túnel do Vento.....	29
Figura 5 – Vista da Distribuição dos Coeficientes de Pressão em um Plano de Longitudinal no Eixo da Cumeeira.....	30
Figura 6 – Vista da Distribuição de Pressão em um Plano Vertical Perpendicular a Cumeeira.....	30
Figura 7 –Malha do Modelo Utilizado no Ensaio.....	32
Figura 8 –Malha Deformada no Colapso.....	32
Figura 9 –Deslocamentos Radiais no Colapso.....	33
Figura 10 –Tensões de Von Misses.....	33
Figura 11 – Aumento de Velocidade do Vento Devido ao Fluxo de Ar Descendente.....	35
Figura 12 – Fenômenos que Provocam Aumento de Velocidade nos Contornos das Edificações de Seção Quadrada.....	35
Figura 13 – Fenômenos que Provocam Aumento de Velocidade nos Contornos das Edificações de Seção Octogonal e Circular.....	36
Figura 14 – Pavimento Inferior com Dimensões Superior aos Edifícios.....	36
Figura 15 – Edifício com Planta Circular.....	37
Figura 16 – Perfis de Velocidade Média do vento (km/h) de Acordo com a Rugosidade do Terreno.....	39
Figura 17 – Gráficos das Isopletas da Velocidade Básica do Vento (m/s).....	41
Figura 18 – Gráficos das Isopletas da Velocidade Básica do Vento, em m/s, para o Estado de São Paulo.....	41
Figura 19 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto.....	45
Figura 20 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto com abertura.....	45

Figura 21 – Planta da Edificação Cilíndrica com a Incidência do Vento e o Ângulo de Incidência.....	47
Figura 22 – Turbulência de Esteira.....	50
Figura 23 – Desprendimento de Vórtices.....	51
Figura 24 – Representação Esquemática do Efeito do Galope.....	52
Figura 25 – Representação do Efeito de Venturi.....	52
Figura 26 – Geometria do Elemento Fluid 141.....	54
Figura 27 – Geometria do Elemento Fluid 142.....	54
Figura 28 – Geometria do Elemento Shell 93.....	55
Figura 29 – Geometria da Torre e Ângulo de Incidência do Vento para a Análise Bidimensional.....	56
Figura 30 – Geometria da Torre e Ângulo de Incidência do Vento em um Plano Longitudinal para a Análise Tridimensional.....	56
Figura 31 – Geometria da Torre e Ângulo de Incidência do Vento em um Plano Transversal para a Análise Tridimensional.....	57
Figura 32 – Escolha do Tipo de Elemento.....	58
Figura 33 – Descretização da Área de Controle.....	58
Figura 34 – Descretização do Volume de Controle.....	59
Figura 35 – Criação do Modelo da Torre para a Análise Bidimensional.....	60
Figura 36 – Criação do Modelo da Torre para a Análise Tridimensional.....	60
Figura 37 – Operação Booleans para o Caso Bidimensional.....	61
Figura 38 – Operação Booleans para o Caso Tridimensional.....	61
Figura 39 – Características do Fluido.....	62
Figura 40 – Descretização da Malha para o Caso Bidimensional.....	63
Figura 41 – Descretização da Malha para o Caso Tridimensional.....	63
Figura 42 – Escolha da Característica do Fluxo (Turbulencia).....	64
Figura 43 – Propriedades do Fluido (Densidade e Viscosidade).....	65
Figura 44 – Habilitação dos Coeficientes de Pressão.....	66
Figura 45 – Escolha do Modelo de Turbulência.....	67
Figura 46 – Habilitação das Velocidades.....	68
Figura 47 – Habilitação das Pressões.....	68
Figura 48 – Condições de Contorno para o Caso Bidimensional.....	69
Figura 49 – Condições de Contorno para o Caso Tridimensional.....	70

Figura 50 – Definição do Plano onde se Deseja Obter os Coeficientes de Pressão.....	71
Figura 51 – Análise das Soluções.....	72
Figura 52 – Campo de Vetor Velocidade (m/s) da Análise Bidimensional.....	73
Figura 53 – Campo de Vetor Velocidade (m/s) em um Plano Longitudinal da Análise Tridimensional.....	73
Figura 54 – Coeficientes Externos de Pressão a uma Altura de 7.5 Metros.....	74
Figura 55 – Coeficientes Externos de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros.....	76
Figura 56 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros.....	76
Figura 57 – Coeficientes Externos de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de zero Metros de Altura (Chão).....	77
Figura 58 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de zero Metros de Altura (Chão).....	78
Figura 59 – Coeficientes Externos de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 5 Metros de Altura.....	79
Figura 60 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 5 Metros de Altura....	80
Figura 61 – Coeficientes Externos de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 10 Metros de Altura.....	81
Figura 62 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 10 Metros de Altura..	82
Figura 63 – Coeficientes Externos de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 14 Metros de Altura.....	83
Figura 64 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 14 Metros de Altura..	84
Figura 65 – Descretização e Condição de Contorno da torre.....	129

Figura 66 – Pressões Devido a Ação do Vento Aplicada na Torre.....	130
Figura 67 – Deslocamento da Torre.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de pressão externos em edificações cilíndricas de seção circular.....	47
Tabela 2 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros.....	85
Tabela 3 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros.....	86
Tabela 4 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros.....	87
Tabela 5 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros.....	88
Tabela 6 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros.....	89
Tabela 7 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.50 metros.....	90
Tabela 8 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.00 metros.....	91
Tabela 9 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.50 metros.....	92
Tabela 10 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.00metros.....	93
Tabela 11 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.50 metros.....	94
Tabela 12 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.00 metros.....	95
Tabela 13 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.50 metros.....	96
Tabela 14 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.00 metros.....	97
Tabela 15 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.50 metros.....	98

Tabela 16 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.00 metros.....	99
Tabela 17 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.50 metros.....	100
Tabela 18 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.00 metros.....	101
Tabela 19 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.50 metros.....	102
Tabela 20 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 10.00 metros.....	103
Tabela 21 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	105
Tabela 22 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	106
Tabela 23 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 8 metros de altura.....	107
Tabela 24 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	108
Tabela 25 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	109
Tabela 26 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.15 metros a um plano de referência de 10 metros de altura.....	110
Tabela 27 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 14 metros de altura.....	111

Tabela 28 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	112
Tabela 29 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	113
Tabela 30 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de dez metros de altura.....	114
Tabela 31 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 15 metros de altura.....	115
Tabela 32 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 19 metros de altura.....	116
Tabela 33 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	117
Tabela 34 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	118
Tabela 35 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 10 metros de altura.....	119
Tabela 36 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 15 metros de altura.....	120
Tabela 37 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 20 metros de altura.....	121
Tabela 38 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 24 metros de altura.....	122

Tabela 39 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	123
Tabela 40 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	124
Tabela 41 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 10 metros de altura.....	125
Tabela 42 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 15 metros de altura.....	126
Tabela 43 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 20 metros de altura.....	127
Tabela 44 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 25 metros de altura.....	128

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros.....	86
Gráfico 2 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros.....	87
Gráfico 3 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros.....	88
Gráfico 4 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros.....	89
Gráfico 5 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros.....	90
Gráfico 6 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.50 metros.....	91
Gráfico 7 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.00 metros.....	92
Gráfico 8 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.50 metros.....	93
Gráfico 9 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.00 metros.....	94
Gráfico 10 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.50 metros.....	95
Gráfico 11 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.00 metros.....	96
Gráfico 12 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.50 metros.....	97
Gráfico 13 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.00 metros.....	98
Gráfico 14 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.50 metros.....	99
Gráfico 15 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.00 metros.....	100

Gráfico 16 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.50 metros.....	101
Gráfico 17 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.00metros.....	102
Gráfico 18 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.50 metros.....	103
Gráfico 19 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 10.00 metros.....	104
Gráfico 20 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	105
Gráfico 21 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	106
Gráfico 22 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 8 metros de altura.....	107
Gráfico 23 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	108
Gráfico 24 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	109
Gráfico 25 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 10 metros de altura.....	110
Gráfico 26 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 14 metros de altura.....	111
Gráfico 27 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	112

Gráfico 28 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	113
Gráfico 29 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 10 metros de altura.....	114
Gráfico 30 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 15 metros de altura.....	115
Gráfico 31 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 19 metros de altura.....	116
Gráfico 32 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	117
Gráfico 33 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	118
Gráfico 34 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 10 metros de altura.....	119
Gráfico 35 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 15 metros de altura.....	120
Gráfico 36 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 20 metros de altura.....	121
Gráfico 37 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 24 metros de altura.....	122
Gráfico 38 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura.....	123

Gráfico 39 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 5 metros de altura.....	124
Gráfico 40 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 10 metros de altura.....	125
Gráfico 41 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 15 metros de altura.....	126
Gráfico 42 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 20 metros de altura.....	127
Gráfico 43 – Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 25 metros de altura.....	128

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Justificativa.....	22
1.2. Objetivo.....	22
1.3. Estruturação do Trabalho.....	23
2. RECENTES PESQUISAS.....	24
2.1. Uma Abordagem Sobre o Túnel do Vento.....	24
2.2. Uma Abordagem Sobre a Simulação Numérica.....	29
3. ACÕES DEVIDAS AO VENTO.....	35
3.1. Formas e Proporções da Geometria.....	35
3.2. Pressões Flutuantes.....	37
3.3. Principais Características do Vento Natural.....	38
3.4. Velocidade do Vento.....	40
3.5. Velocidade Característica do Vento.....	42
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS.....	43
4.1. Pressão Total.....	43
4.2. Pressão de Obstrução.....	44
4.3. Efeitos Estáticos Devido ao Vento.....	44
4.3.1. Coeficientes de Pressão.....	44
4.3.2. Coeficientes de Forma.....	46
4.3.3. Coeficientes de Força.....	48
4.4. Efeitos Dinâmicos Devido ao Vento.....	49
4.4.1 Efeitos do Vento em Torres de Telecomunicação.....	49
5. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS.....	53
5.1. Elementos Finitos Utilizados.....	53
5.2. Elaboração do Modelo Numérico.....	55
5.2.1. Definição da Geometria.....	55
5.2.2. Definição do Elemento.....	57
5.2.3. Definição das Características do Fluido e da Discretização das Malhas.....	62
5.2.4. Definição dos Parâmetros da Análise Numérica.....	64
5.2.5. Definição das Condições de Contorno.....	67
5.3. Apresentação dos Resultados da Análise Numérica.....	70

6. ENSAIOS NUMÉRICOS.....	75
7. COMPARAÇÃO ENTRES OS RESULTADOS.....	85
7.1. Análise Bidimensional.....	85
7.2. Análise Tridimensional.....	105
8. INTERAÇÃO FLUIDO ESTRUTURA.....	129
9. CONCLUSÃO.....	132
10. REFERÊNCIAS.....	133
ANEXO A – COEFICIENTES S_1 , S_2 E S_3 PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO OBTIDOS DA NBR 6123 (ABNT, 1988).....	135
ANEXO B – VELOCIDADE NORMALIZADA S_2 E INTERVALO DE TEMPO.....	142
ANEXO C – MUDANÇA DE RUGOSIDADE DO TERRENO.....	147
ANEXO D – FATOR ESTATÍSTICO S_3 PARA A PRBABILIDADE P_m E VIDA ÚTIL DE EDIFICAÇÃO DE M ANOS.....	149

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento constante do sistema de telecomunicação e a necessidade de sua ampliação são os fatores responsáveis pela atual e intensa utilização de torres metálicas. No entanto, observa-se a ocorrência de queda de torres metálicas devido à ação do vento, como nas linhas de transmissão da usina de Itaipu entre Foz do Iguaçu e Ivaiporã no Paraná, em 02 de novembro de 1997, quando dez torres ruíram sob o efeito de ventos de até 130 km/h (36m/s), conforme reportagem do Jornal O Estado de São Paulo do dia 04 de novembro de 1997.

Uma vez que é rara a ocorrência de terremotos no Brasil, o vento passa a ser o fator determinante do projeto de torres, e, portanto, é essencial ter-se estimativas confiáveis das ações devidas ao vento e de seus efeitos na estrutura.

Geralmente as torres para telecomunicação são esbeltas, podendo ser consideradas estruturas em que apenas uma dimensão é relevante.

Segundo Manfrim (2006, p.14), nem sempre a velocidade mais desfavorável é a velocidade máxima prevista para o vento. Para baixas velocidades o regime de escoamento 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 a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.39), 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 o efeito dinâmico do vento é devido à turbulência atmosférica.

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

Os valores dos esforços solicitantes devido ao efeito dinâmico da ação do vento são superiores aos valores do efeito estático, e isso mostra que para projetos onde se procura minimizar os custos de construção oferecendo maiores níveis de segurança, deve-se obrigatoriamente submete-las aos efeitos dinâmicos da ação do

vento para obter-se uma análise estrutural mais próxima da realidade. Bertolino et al (2000).

1.1. Justificativa

A proposta do presente trabalho é realizar um estudo em torres de seção circular sob a ação do vento, para conhecer o campo de velocidade e a distribuição dos coeficientes 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 torre com seção circular na superfície 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 que são propostos pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.18).

1.2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo determinar através da simulação numérica pelo programa ANSYS 9.0, os coeficientes e a distribuição de pressão devida a ação do vento em torres de seção circular, e posteriormente compará-los com os coeficientes obtidos da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.18), a fim de validar a utilização do programa ANSYS 9.0 para obtenção dos coeficientes de pressão em diversas estruturas.

1.3. Estruturação do Trabalho

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho foi dividido em 9 capítulos cujos conteúdos são apresentados na seqüência:

No capítulo 1: Apresenta uma introdução sobre o assunto que é objeto de estudo deste trabalho de pesquisa, assim como a proposta do presente trabalho;

No capítulo 2: Relaciona as pesquisas realizadas sobre o tema;

No capítulo 3: Apresenta as ações devidas ao vento;

No capítulo 4: Apresenta os fundamentos teóricos, bem como os efeitos dinâmicos devida a ação do vento;

No capítulo 5: Apresenta a descrição dos modelos numéricos utilizados para a simulação numérica do modelo das torres;

No capítulo 6: Apresenta os ensaios numéricos;

No capítulo 7: Apresenta a comparação entre os valores obtidos pelo programa ANSYS e os valores obtidos da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.18);

No capítulo 8: Apresenta os resultados obtidos da iteração fluido-estrutura;

No capítulo 9: Apresenta as conclusões finais sobre os estudos efetuados;

2. RECENTES PESQUISAS

2.1. Uma Abordagem Sobre o Túnel do Vento

Segundo Loredo – Souza (2004), túnel do vento é um equipamento que permite simular escoamento atmosférico, ou seja, o vento, de forma a que, dentro do túnel, tenha-se as mesmas condições que no ambiente exterior. Estas condições variam de local para local e, portanto, o equipamento encontra-se preparado para o mais variado leque de situações. Para que se consiga simular convenientemente o escoamento atmosférico são feitas maquetes referentes à situação a ser estudada. Fisicamente falando, tudo é realizado segundo a chamada teoria da semelhança, ou seja, cria-se no túnel uma situação semelhante àquela que acontece no ambiente exterior. Isto não acontece apenas do ponto de vista geométrico, pois todos os parâmetros têm que ser idênticos à situação real.

A figura 1 representa o túnel do vento do Professor Joaquim Blessmann.



Figura 1 – Túnel do Vento Prof. Joaquim Blessmann. Fonte: Loredo – Souza (2004)

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.

Foi verificado por Blessmann (2004) que quando se utiliza telhado a quatro águas, os pontos de sucção em alguns casos chegam a reduzir pela metade do seu

valor, evitando assim a ocorrência do arrancamento de telhas como no caso de telhados em duas águas.

Loredo-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, Loredo-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 modelo do edifício no interior do túnel do vento.



Figura 2 – Modelo Reduzido do Edifício no Interior do Túnel do Vento. Fonte: Loredo-Souza (2004)

No estudo do edifício de 120 metros de altura que será construído na cidade de São Paulo, Loredo-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.

Com relação à proposta para a cobertura do Estádio Castelão, localizado em Fortaleza/Ceará, Loredo-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, Loredo-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 3).



Figura 3 – Modelo Reduzido do Edifício e sua Vizinhança no Interior do Túnel de Vento. Fonte: Loredo-Souza (2004)

Com o decorrer dos anos, Loredou-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 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 Loredou (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 (2005) 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 (2005) 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.

Loredo-Souza et al (2003), estudaram o comportamento de um modelo reduzido de uma torre seccional no túnel do vento, realizaram um total de vinte ensaios considerando-se as diferentes velocidades e ângulos de incidência do vento. O objetivo do estudo foi a determinação dos coeficientes de arrasto para o trecho do módulo ensaiado o qual tem seção transversal triangular, sendo os montantes constituídos por colunas poligonais com 18 lados, tronco – cônicos.

Loredo-Souza et al (2003), relata ainda que maiores níveis de segurança e confiabilidade são atingidos quando a consideração criteriosa dos efeitos do vento é feita a partir da etapa de concepção. Este processo preventivo, é, geralmente, o de menor custo e o de maior eficiência. Por essas razões e por não existirem nas

normas de vento coeficientes aerodinâmicos específicos para o segmento de torres estudado, foram realizados os ensaios no túnel do vento (figuras 4).



Figura 4 – Modelo Reduzido de uma Torre de Seção Triangular no Interior do Túnel do Vento.
Fonte: Loredo-Souza (2003)

2.2. Uma Abordagem Sobre a Simulação Numérica

Manfrim (2006) realizou um trabalho para 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 foram 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 figuras 5 e 6 mostram os coeficientes de pressão obtidos em um plano longitudinal e vertical ao longo da cumeeira.

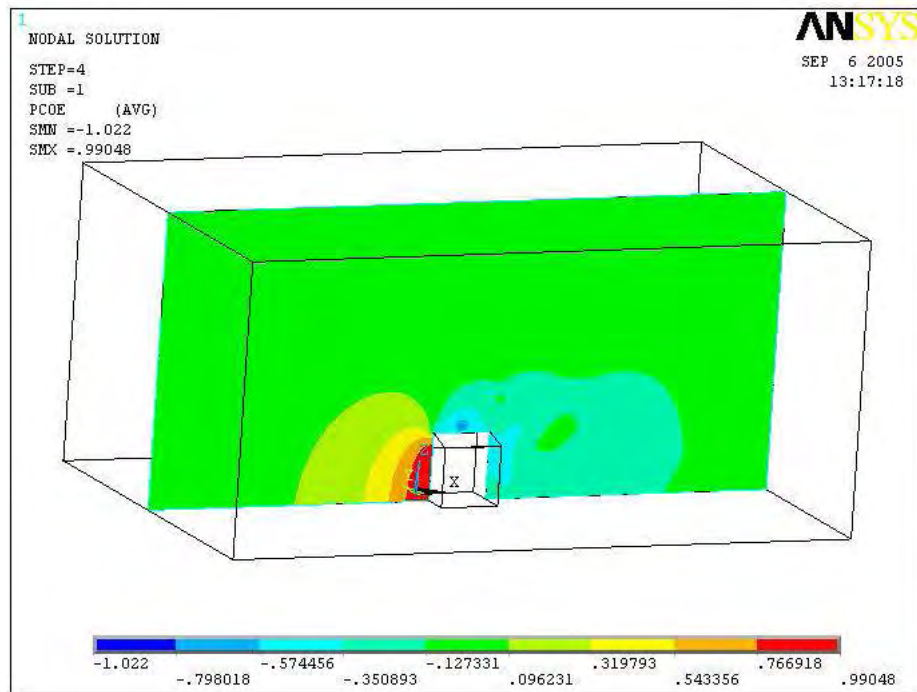


Figura 5 - Vista da Distribuição dos Coeficientes de Pressão em um Plano Longitudinal no Eixo da Cumeeira. Fonte: Manfrim (2006)

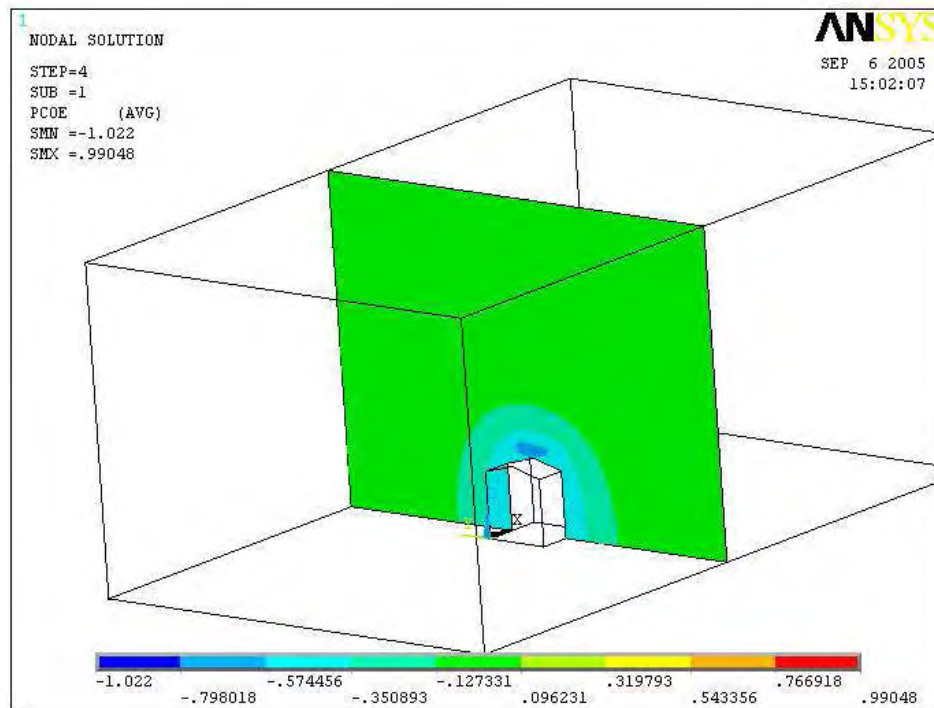


Figura 6 – Vista da distribuição dos coeficientes de pressão em um plano vertical perpendicular a cumeeira. Fonte: Manfrim (2006)

Manfrim (2006) observou que 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.

Sampaio (2004) realizou um trabalho para verificar numericamente através do programa ANSYS o comportamento de cada sistema de ligação de treliças espaciais de seção circular.

Pasqualino (1996) realizou um estudo sobre o colapso de cascas cilíndricas enrijecidas sob pressão hidrostática utilizando resultados experimentais obtidos pelo laboratório de tecnologia submatina – COPPE/UFRJ e análises numéricas pelo métodos dos elementos finitos. Os testes experimentais com os modelos ensaiados foram modelados pelo método dos elementos finitos, com o auxílio do programa ANSYS, no intuito de verificar seus modos de falha e respectivas cargas de colapso. O modelo numérico foi constituído basicamente de um malha de elementos de casca, para a análise estática não –linear, incorporando rotações moderadas, pequenas deformações. O modelo foi discretizado pelo elemento de casca (Shell 43) quadrangular plástico com quatros nós e seis graus de liberdade por nó. A figura 7 apresenta a discretização da malha utilizada no ensaio.

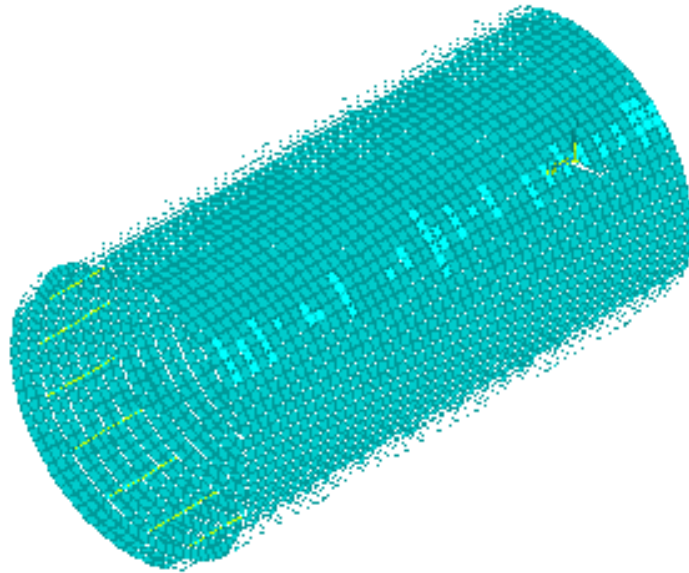


Figura 7 – Malha do Modelo Utilizado no Ensaio. Fonte: Pasqualini (1996)

As condições de carregamento utilizadas na análise foi a pressão externa radial combinada com a carga axial e a condição de contorno de engastamento dos bordos. A figura 8 mostra a malha de formada no colapso.

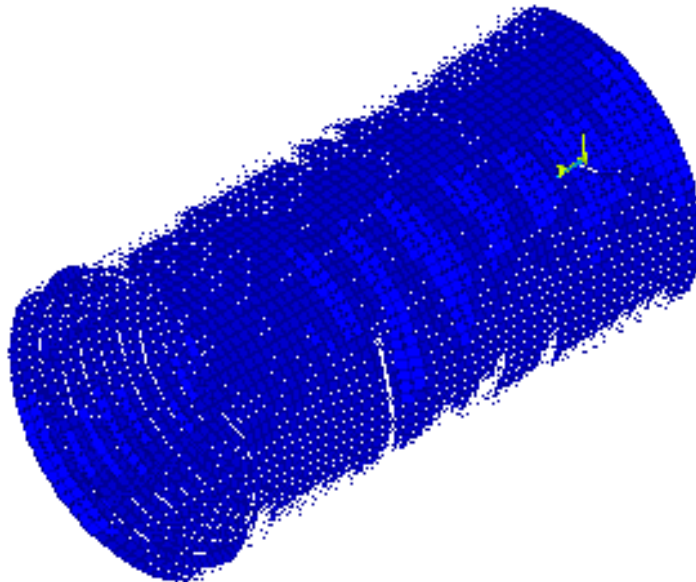


Figura 8 – Malha Deformada no Colapso. Fonte: Pasqualini (1996)

A figura 9 mostra os deslocamentos radiais no colapso.

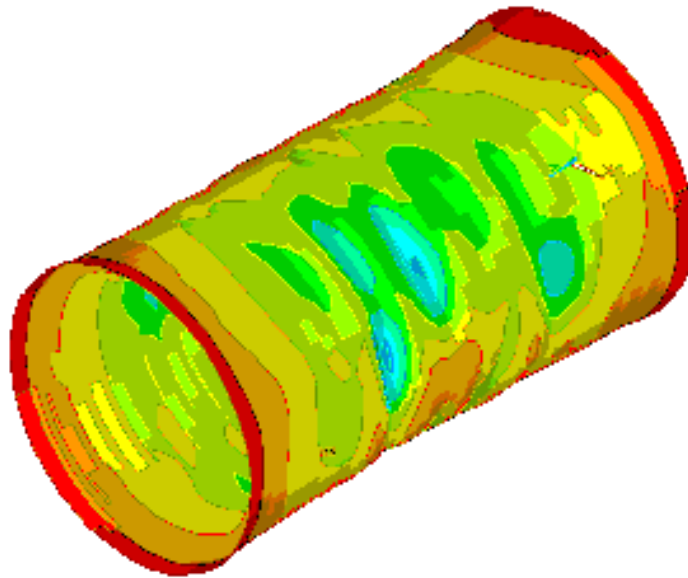


Figura 9 – Deslocamentos Radiais no Colapso. Fonte: Pasqualini (1996)

A figura 10 mostra as tensões equivalentes de Von Mises.

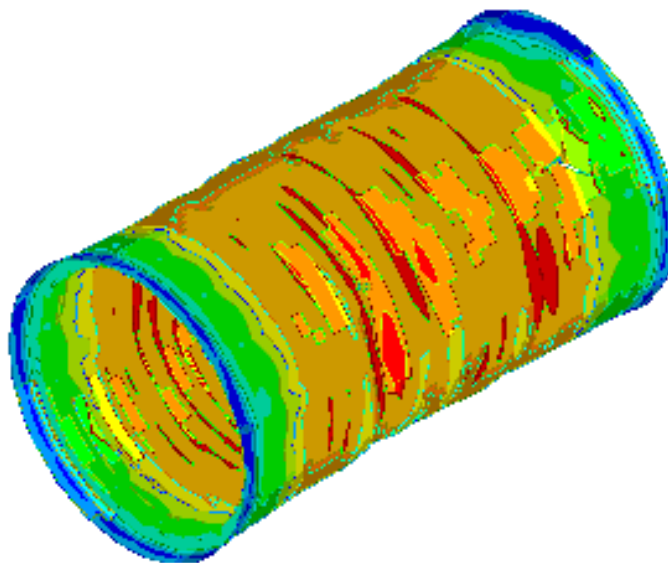


Figura 10 – Tensões Equivalentes de Von Mises . Fonte: Pasqualini (1996)

Gomes et al (2005), realizou um estudo experimental e numérico sobre a pressão do vento em formas geométricas irregulares. As experiências foram realizadas no túnel do vento para três formas geométricas diferentes, sendo uma forma geométrica cúbica, uma forma geométrica em forma de L e uma forma geométrica em forma de U. Além dos ensaios experimentais, foi realizado uma análise numérica utilizando Computation Fluid Dynamic, para fornecer uma melhor compreensão dos valores das distribuições de pressão obtidas nos modelos ensaiados.

Gomes et al (2005), comparou os valores de distribuição de pressão nos ensaios numéricos e nas análises numéricas para a incidência normal e oblíqua do vento, verificando que a incidência normal fornece valores mais coerentes que os outros ângulos de incidências utilizados.

3. ACÕES DEVIDAS AO VENTO

3.1. Formas e Proporções da Geometria

Segundo Gonçalves et al (2004), o aumento de velocidade do vento que ocorre próximo ao terreno está associado ao fluxo de ar descendente que ocorre na parede de barlavento, combinado com os vórtices que surgem nos cantos a barlavento da edificação como mostra a Figura 11.

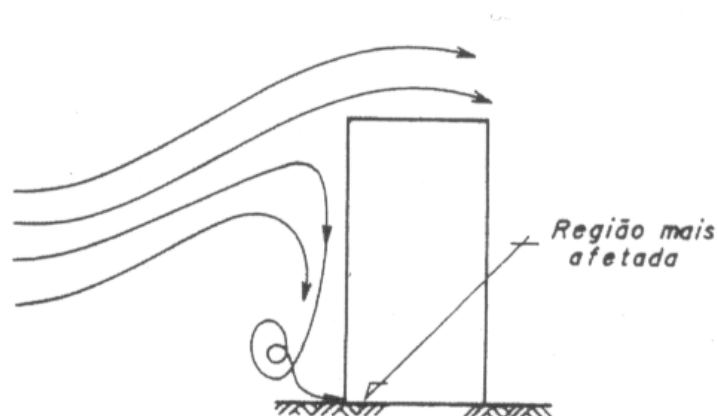


Figura 11 – Aumento da Velocidade do Vento Devido ao Fluxo de Ar Descendente. Fonte: Gonçalves et al (2004)

Paralelamente a esse efeito causado pela própria edificação, que quanto mais alta maior será a velocidade do vento na região próxima ao terreno. Dependendo da forma e dimensões das edificações, elas podem inviabilizar a utilização de áreas próximas devido o aumento de velocidade em torno da edificação como mostram as Figuras 12 e 13.

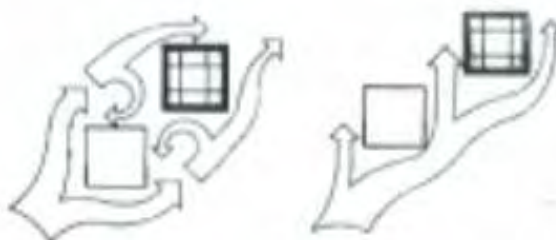


Figura 12 – Fenômenos que Provocam Aumento de Velocidade nos Contornos das Edificações Seção de Quadrada. Fonte: Gonçalves et al (2004)

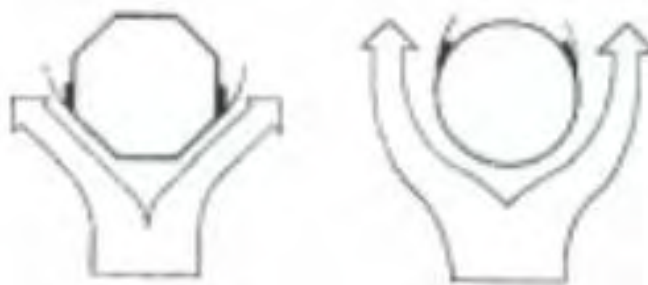


Figura 13 – Fenômenos que Provocam Aumento de Velocidade nos Contornos das Edificações de Seção Octogonal e Circular. Fonte: Gonçalves et al (2004)

Do ponto de vista arquitetônico existem algumas soluções que se aplicam quando o aumento de velocidade do vento pode inviabilizar a utilização de áreas próximas de edificações, particularmente em cidades em que a frequência de ocorrência de ventos moderados e fortes é elevada, como mostram as Figuras 14 e 15.

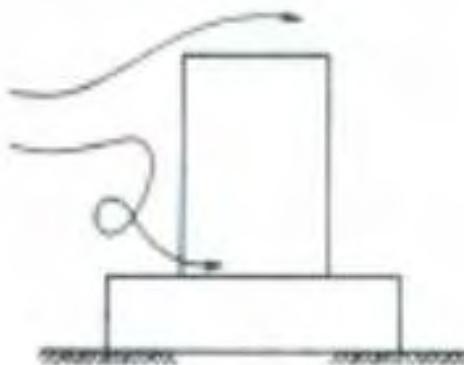


Figura 14 – Pavimento Inferior com Dimensões Superior aos Edifícios. Fonte: Gonçalves et al (2004)

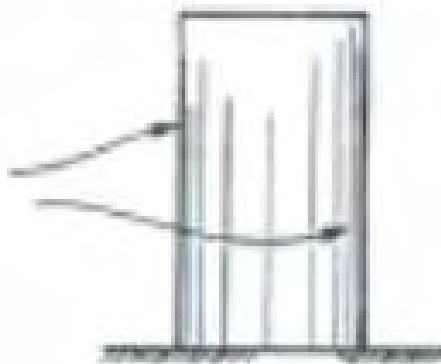


Figura 15 – Edifícios com Planta Circular. Fonte: Gonçalves et al (2004)

3.2. 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 freqüência.

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.

3.3. Principais Características do Vento Naturais

Segundo Pitta (2001), 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 ($v_g = 160\text{km/h}$):

$$V_z = V_g \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (1)$$

z_g e α dependem da rugosidade do terreno e estão indicadas na Figura 16 para três superfícies típicas:

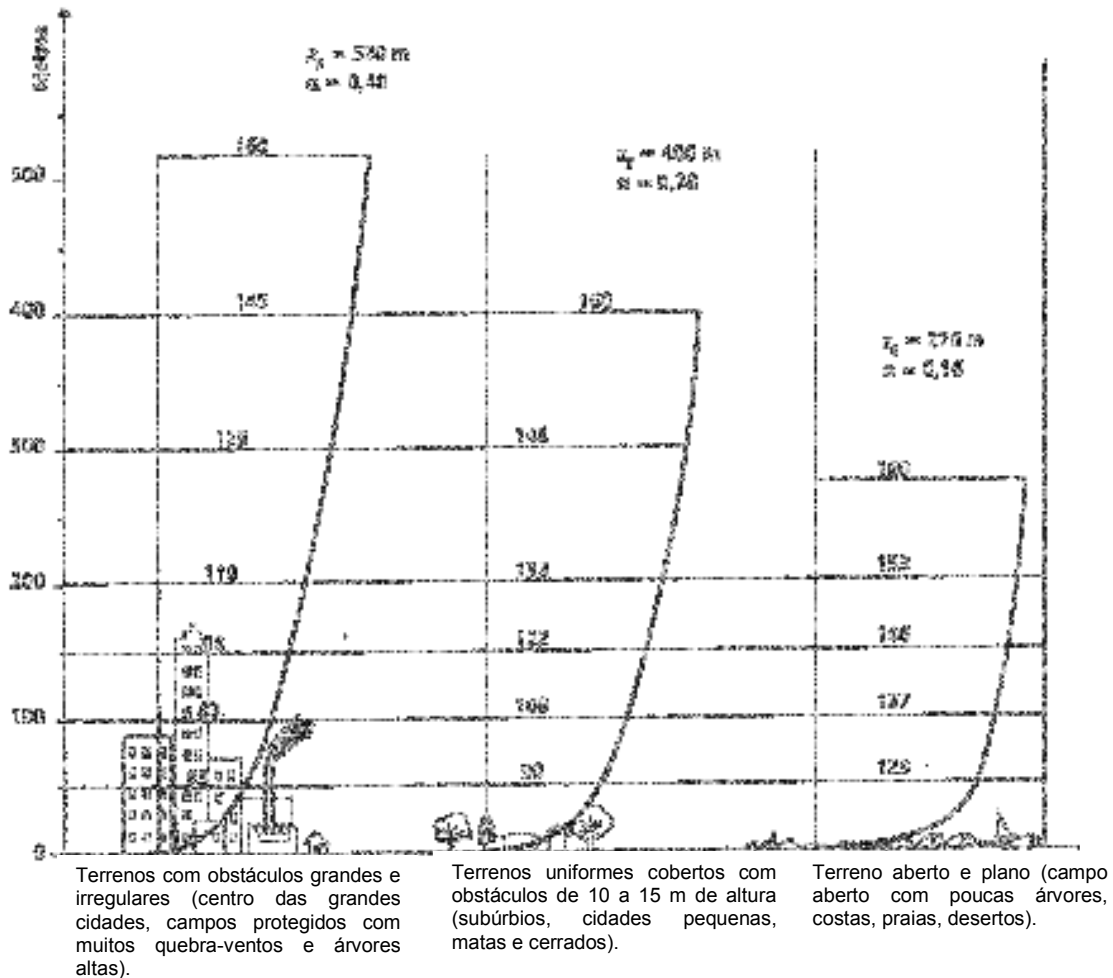


Figura 16 – Perfis de Velocidade Média do Vento (Km/h) de Acordo com a Rugosidade do Terreno, Segundo Davenport (apud Pitta, 2001)

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:

$$t = \frac{C}{v} = 6a9 \left(\frac{H}{v} \right) \quad (2)$$

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

3.4. Velocidade do Vento

Segundo Pitta (2001), 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.

Pitta (2001) cita ainda, que com essas informações, por meio de tratamento estatísticos adequado, considerando-se que a maioria das edificações tem vida útil de 50 anos e definindo-se um grau de confiabilidade, é possível determinar a velocidade básica do vento, ou: velocidade de uma rajada de três segundos, que pode ser extraída (com uma probabilidade de 63%) uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima de terreno, em campo aberto e plano, e gerar um gráfico com curvas de igual velocidade do vento (isopletas para todo o país).



Figura 17- Gráfico das Isopletas da Velocidade Básica do Vento (m/s).Fonte:Pitta (2001)

Para facilitar a leitura, Pitta (2001), fornece o gráfico das isopletas para o Estado de São Paulo.

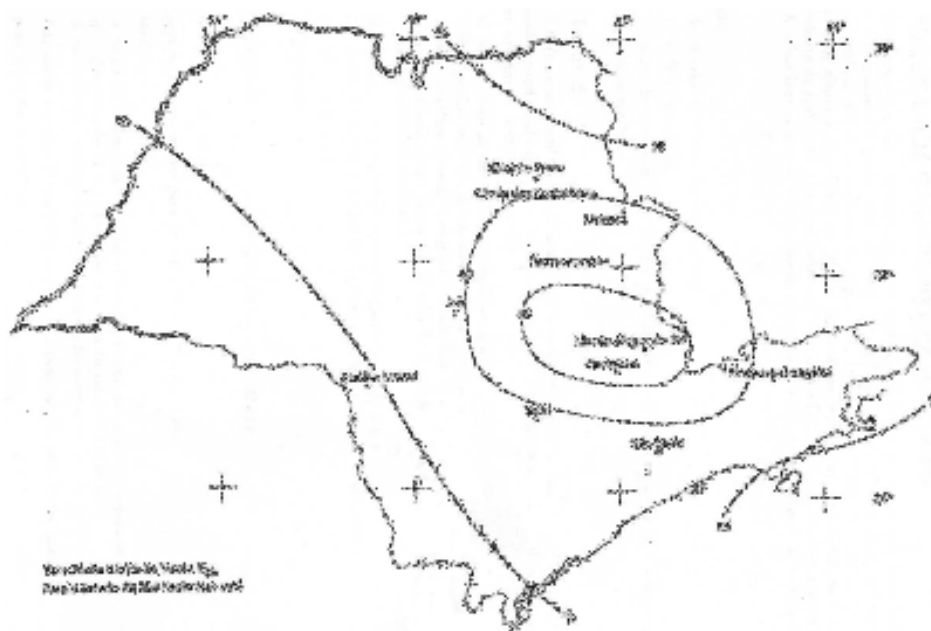


Figura 18 – Gráfico das isopletas da velocidade básica do vento, em m/s, para o Estado de São Paulo.Fonte: Pitta (2001)

3.5. 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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.5-11), a velocidade característica do vento é calculada pela seguinte expressão:

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (3)$$

onde:

V_o : velocidade básica do vento no local;

S_1 : fator topográfico que considera as variações de relevo de terreno no entorno da edificação.

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;

S_3 : 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 a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.5-11).

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. Pressão Total

Segundo Pitta (2001), 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:

$$P_k + \frac{1}{2}\rho v_k^2 = P_e + \frac{1}{2}\rho v_e^2 \quad (4)$$

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

$$P_k + \frac{1}{2}\rho v_k^2 = P_e \quad (5)$$

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.

4.2. Pressão de Obstrução

A diferença das pressões estáticas citadas na equação 5 é conhecida como pressão de obstrução (q).

$$P_e - P_k = \frac{1}{2} \rho v_k^2 = q \quad (6)$$

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

$$q = \frac{1}{2} \rho v_k^2 = \frac{1}{2} 1,225 v_k^2 = 0,613 v_k^2 \quad (7)$$

O valor 0,613 vale para condições normais de pressão e temperatura (1atm e 15°C), Pitta (2001).

4.3. Efeitos Estáticos 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).

4.3.1. Coeficientes de Pressão

Segundo Pitta (2001), sendo um objeto mergulhado em um fluido em movimento uniforme (figura 19). 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.

$$P_k + \frac{1}{2} v_k^2 = P_p + \frac{1}{2} \rho v_p^2 \quad (8)$$

No ponto p, a pressão efetiva é dada por:

$$\Delta P_p = P_p - P_k = \frac{1}{2} \rho (v_k^2 - v_p^2) \Rightarrow \Delta P_p = \frac{1}{2} \rho v_k^2 \left(1 - \frac{v_p^2}{v_k^2}\right) \quad (9)$$

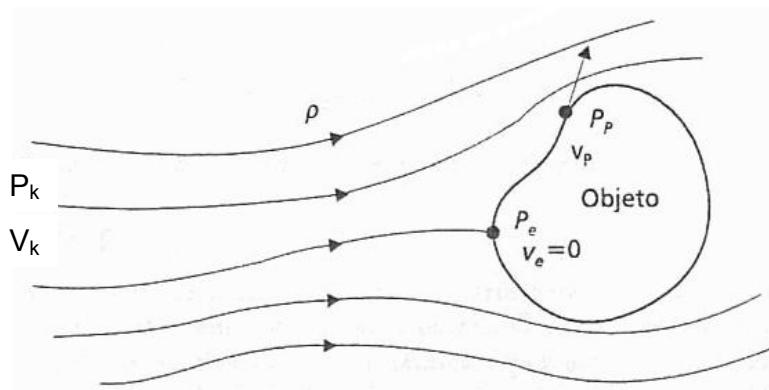


Figura 19 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto. Fonte: Pitta (2001)

Substituindo na equação 6:

$$\Delta P_p = q \left(1 - \frac{V_p^2}{V_k^2} \right) \quad (10)$$

$$\therefore \Delta P_p = c_p q \quad (11)$$

onde:

$$c_p = \left(1 - \frac{V_p^2}{V_k^2} \right) \quad (12)$$

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 da pressão de obstrução, ou seja, $c_p = 1$. 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 20.

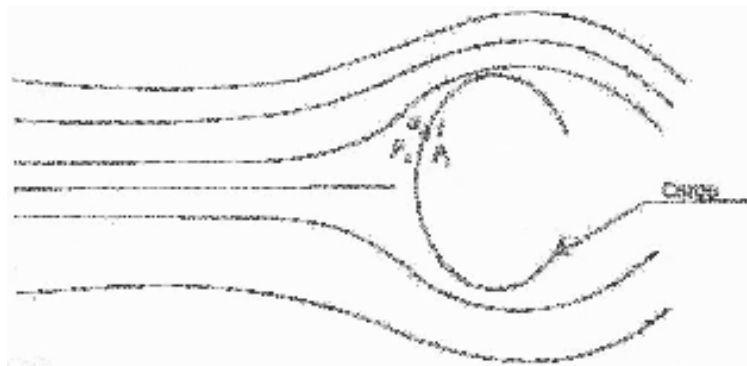


Figura 20 – Linhas de Fluxo no Entorno de um Objeto com Abertura. Fonte: Pitta (2001)

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

$$c_{pe} = \frac{\Delta_{pe}}{q} \quad (13)$$

$$c_{pi} = \frac{\Delta_{pi}}{q} \quad (14)$$

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

$$\Delta P = \Delta P_e - \Delta P_i \quad (15)$$

onde:

ΔP_e : pressão efetiva externa;

ΔP_i : pressão efetiva interna.

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

Das equações 13, 14, 15, tem-se:

$$\Delta P = q(c_{pe} - c_{pi}) \quad (16)$$

4.3.2. 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:

$$F = F_e - F_i \quad (17)$$

sendo:

F_e : força externa à edificação;

F_i : força interna à edificação.

$$F = (c_e - c_i)qA \quad (18)$$

onde:

$$c_e = \frac{F_e}{qA} \text{ (coeficientes de forma externos)} \quad (19)$$

$$c_i = \frac{F_i}{qA} \text{ (coeficientes de forma internos)} \quad (20)$$

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

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.18) fornece os coeficientes de pressão e de forma, externos, para diversos tipos de edificação que serão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de pressão externos em edificações cilíndricas de seção circular.
Fonte: NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.18)

β	Coeficiente de pressão externa C_{pe}			
	Superfície rugosa ou com saliência		Superfície lisa	
	$h/d = 10$	$h/d \leq 2,5$	$h/d = 10$	$h/d \leq 2,5$
0°	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
10°	+0,9	+0,9	+0,9	+0,9
20°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
30°	+0,4	+0,4	+0,35	0,35
40°	0	0	0	0
50°	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5
60°	-0,95	-0,8	-1,2	-1,05
70°	-1,25	-1,1	-1,4	-1,25
80°	-1,2	-1,05	-1,45	-1,3
90°	-1,0	-0,85	-1,4	-1,2
100°	-0,8	-0,65	-1,1	-0,85
120°	-0,5	-0,35	-0,6	-0,4
140°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
160°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
180°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25

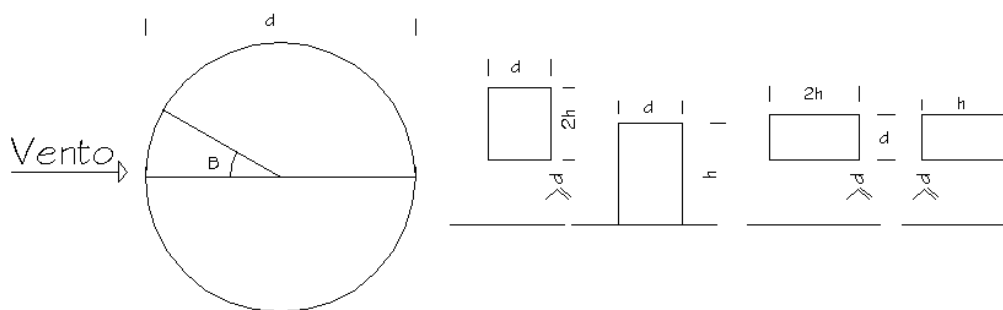


Figura 21 – Planta da Edificação Cilíndrica com a Incidência do Vento e o Ângulo de Incidência.
Fonte: NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.18)

Para a determinação das pressões externas em uma edificação cilíndrica de seção circular devem ser usados os valores dos coeficientes de pressão externos (C_{pe}) da tabela 1. Estes coeficientes aplicam-se somente em fluxo acima da região crítica. Isto é, para número de Reynolds (R_e) acima de 420000 e com vento incidindo perpendicularmente ao eixo do cilindro de diâmetro d .

O número de Reynolds (R_e) é determinado pela equação:

$$Re = 70000 \times V_k \times d \quad (21)$$

Onde :

V_k : velocidade característica em metros por segundo;

d : diâmetro do cilindro em metros.

4.3.3. 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, como mostra a equação 22.

$$C_{g} = \frac{F_g}{qA} \quad (22)$$

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, como mostra a equação 23.

$$C_a = \frac{F_a}{qA} \quad (23)$$

- **Coeficiente de sustentação:** quando a componente global é perpendicular ao plano do horizonte, como mostra a equação 24.

$$C_s = \frac{F_s}{qA} \quad (24)$$

- **Coefficiente de força lateral:** quando a componente de força global é normal à direção do vento e está contida no plano do horizonte, como mostra a equação 25.

$$C_l = \frac{F_l}{qA} \quad (25)$$

- **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, como mostra a equação 26.

$$C_h = \frac{F_h}{qA} \quad (26)$$

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.

4.4. Efeitos Dinâmicos Devidos ao Vento

A ação dinâmica do vento em determinada edificação não pode ser desprezada, pois estes efeitos aumentam muito as solicitações, o que pode levar a estrutura a ruína.

A resposta dinâmica de uma edificação está relacionada à frequência natural, ao grau de amortecimento dos materiais empregados e à rigidez global, sendo, portanto, uma particularidade de cada edificação. Estes efeitos são importantes em estruturas esbeltas e flexíveis, Pitta (2001).

4.4.1. Efeitos do Vento em Torres de Telecomunicação

Quando se fala em efeito do vento em torres metálicas deve-se perguntar a que tipo de ações essas estruturas estão sujeitas, ou melhor, qual as ações ou a ação principal que excitam esse tipo de estrutura.

Segundo Carril (2000), devido ao baixo peso da estrutura e a pouca importância de terremotos no Território nacional, o vento é principal agente que determina o projeto de torres metálicas para telecomunicações.

Separando-se o vento natural em uma parte média e outra flutuante, os possíveis esforços que podem estar atuando nesse tipo de estrutura são os esforços

pseudo - estático correspondente à parte média do vento e os esforços dinâmicos decorrentes da parte flutuante, Carril (2000).

As possíveis forças devidas ao vento que podem estar excitando as torres de telecomunicação são:

- **Forças de Martelamento Devidas as Turbulências Atmosfericas**

O martelamento, segundo Gonçalves et al (2004) é definido como a excitação da estrutura pela flutuação da velocidade do vento. Se o martelamento estiver associado à turbulência gerada pela presença de uma construção à frente da estrutura, o carregamento é chamado de martelamento de esteira, como mostra a Figura 22.



Figura 22 – Turbulência de Esteira. Fonte: Gonçalves et al (2004)

Nesse caso, a geração de turbilhões pelos obstáculos a barlavento em uma determinada frequência gera efeitos dinâmicos que poderão ser de grande intensidade se a frequência excitadora coincidir com uma das frequências naturais de vibração da estrutura. Blessmann (1998) define o martelamento de esteira sendo simplesmente martelamento, e o martelamento devido à turbulência atmosférica como sendo a excitação de uma estrutura pelas rajadas de vento.

As estruturas das torres usadas para telefonia celular estão predominantemente sujeitas a forças de martelamento devido a turbulência atmosférica.

- **Desprendimento de Vórtices**

Em muitos corpos rombudos, para número de Reynolds maior que, aproximadamente, 30, aparece um desprendimento alterado de vórtices com uma

freqüência bem definida. São os chamados vórtices de Kármán que geram forças oblíquas em relação à direção do vento médio.

A componente dessa força na direção da velocidade média excita a estrutura na freqüência individual do desprendimento dos vórtices, e a componente da força na direção transversal do vento médio excita a estrutura na freqüência do desprendimento de cada par de vórtices. Elas geram oscilações na estrutura na direção em que agem. Na direção do vento é pequena em comparação à componente transversal do vento.

Na prática, as oscilações na direção do vento devidas ao desprendimento dos vórtices raramente ocorrem. A figura 23 ilustra o desprendimento de vórtices de uma estrutura circular, as oscilações transversais e as possíveis deformações da estrutura, Carril (2000).

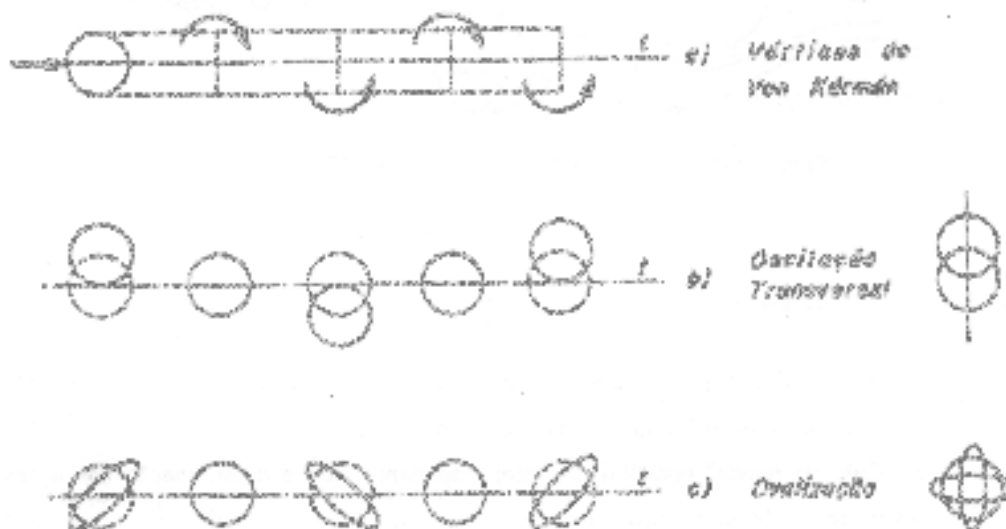


Figura 23 – Desprendimento de Vórtices. Fonte: Gonçalves et al (2004)

- **Instabilidade Aerodinâmica por Galope**

Segundo Gonçalves et al (2004), o fenômeno de instabilidade aerodinâmica por galope é caracterizado por grandes amplitudes de vibração em freqüências muito baixas.

O surgimento da instabilidade por galope depende de uma determinada velocidade do vento chamada velocidade de disparo. A amplitude de oscilação aumenta com a velocidade do vento durante a oscilação for desenvolvida uma força

na direção e sentido do movimento, energia será extraída do vento continuando o movimento oscilatório.

Segundo Pitta (2001), o efeito de galope ocorre devido à turbulência existente na esteira de uma edificação situada a barlavento. Os vórtices desprendidos da edificação a barlavento irão solicitar a edificação de maneira sucessiva, podendo produzir oscilações cuja frequência será definida pela turbulência da esteira, como mostra a Figura 24.



Figura 24 – Representação Esquemática do Efeito do Galope. Fonte: Gonçalves et al (2004)

- **Efeito de Venturi**

O efeito de Venturi, figura 25, é causado pelo afunilamento do vento devido à proximidade de outras edificações, causando uma aceleração de velocidade do vento na região do afunilamento e conseqüentemente, alterando as pressões nas edificações, Gonçalves et al (2004).

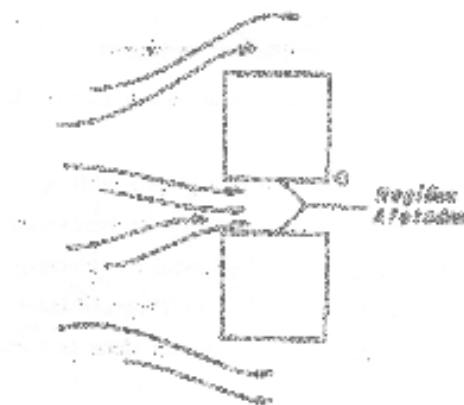


Figura 25 – Representação do Efeito de Venturi. Fonte: Gonçalves et al (2004)

5. DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

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

As distribuições de pressão foram determinadas para relações geométricas entre a altura e o diâmetro (h/d) para valores menor ou igual a 10.

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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.5-11). Assim sendo, a velocidade característica considerada para a simulação do vento é igual à velocidade básica de 40m/s.

No caso em estudo, considera-se o fluido onde a torre está inserida, com as seguintes características: fluido turbulento, incompressível, isotérmico, com densidade de 1,225 kg/m³ e viscosidade de 1,79e-005 kg/ms.

5.1. Elementos Finitos Utilizados

Os elementos finitos utilizados na análise numérica das torres serão descritos a seguir:

O Fluid141 bi-dimensional 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 26 mostra a geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento. O elemento é definido por 4 nós e pela propriedade do material. Um elemento de forma triangular pode ser formado como mostrado na Figura 26:

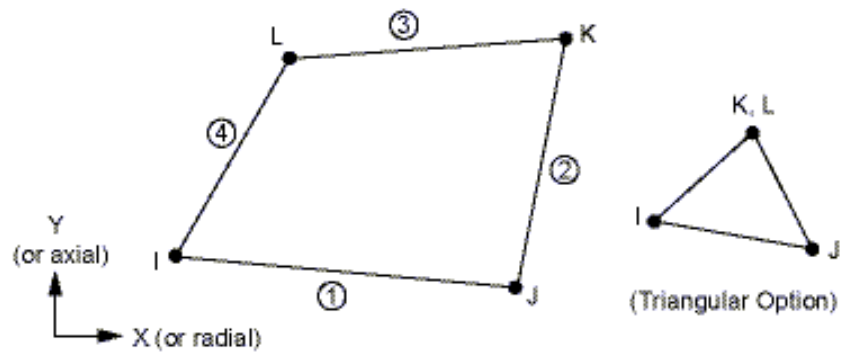


Figura 26 – Geometria do Elemento Fluid 141. Fonte: Ansys 9.0

O Fluid142 tri-dimensional 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 27 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, bem como um elemento em forma de cunha ou pirâmide como mostrado na Figura 27:

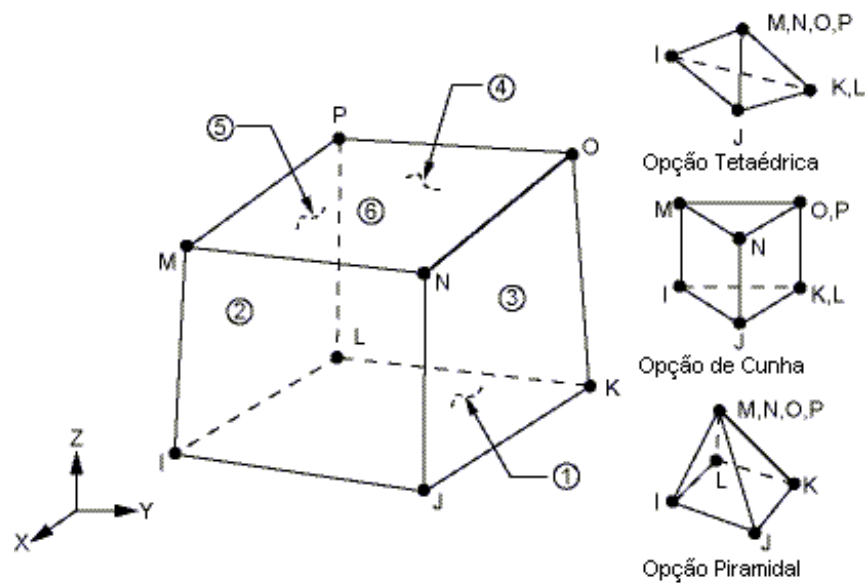


Figura 27 – Geometria do Elemento Fluid 142. Fonte: Ansys 9.0

O elemento Shell 93 é um elemento de casca utilizado principalmente para modelos curvos. A figura 28 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 triangular pode ser formado como mostrado na Figura 28:

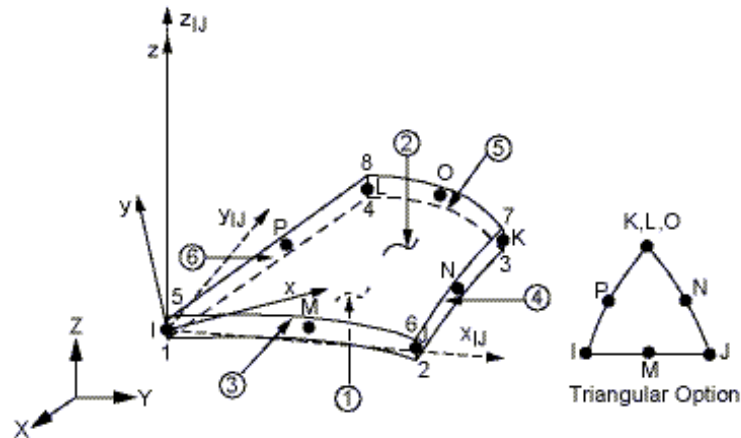


Figura 28 – Geometria do Elemento Shell 93. Fonte: Ansys 9.0

5.2. Elaboração do Modelo Numérico

Nesta parte será apresentado o desenvolvimento do modelo numérico a ser utilizado para obtenção do campo de velocidades, pressões e dos coeficientes externos de pressões.

5.2.1. Definições da Geometria

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 torres que serão descritos a seguir.

As torres a serem analisadas terão dimensões em uma relação geométrica em planta entre a altura e de diâmetro (h/d) para valores menor ou igual a 10, com diâmetro variando de 1,00 a 10,00 metros na análise bidimensional e com diâmetro variando de 1,00 a 3,00 metros na análise tridimensional. O ângulo de incidência do vento será de 0° tanto na análise bidimensional quanto na análise tridimensional.

As figuras 29, 30 e 31 mostram os parâmetros geométricos da torre e o ângulo de incidência do vento utilizado nas simulações numéricas.

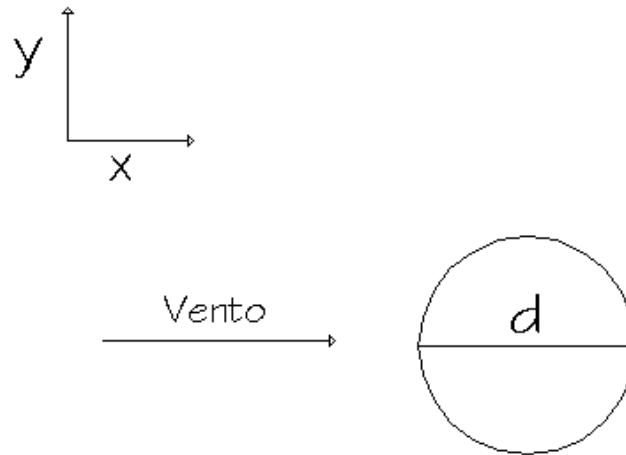


Figura 29 – Geometria da Torre e Ângulo de Incidência do Vento para Análise Bidimensional

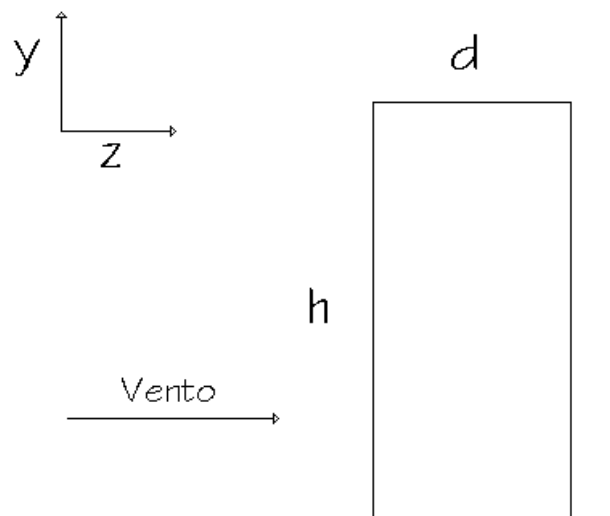


Figura 30 – Geometria da Torre e Ângulo de Incidência do Vento em um Plano Longitudinal para Análise Tridimensional

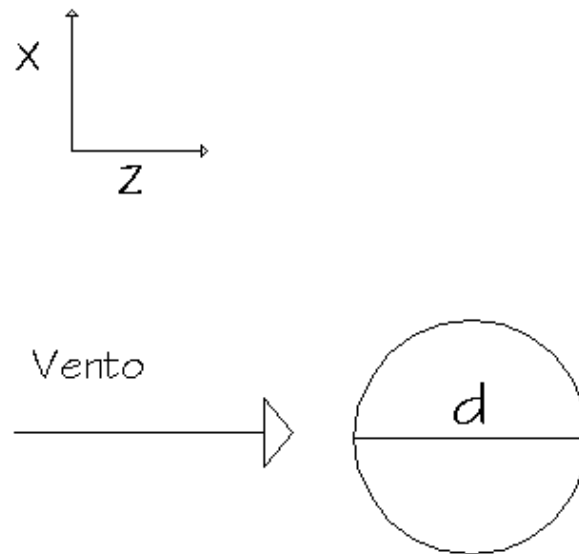


Figura 31 – Geometria da Torre e Ângulo de Incidência do Vento em um Plano Transversal para Análise a Tridimensional

Onde:

h : altura da torre;

d : diâmetro da torre;

5.2.2. Definição do Elemento

Definida a geometria a ser utilizada a necessidade de habilitar o ANSYS FLUID (Preferences e habilita FLOTRAN CFD). Realizado este passo define-se o tipo de elemento, ou seja, definir se o modelo será analisado bidimensional ou tridimensional, para que isso seja realizado o ANSYS FLOTRAN que é uma opção simplificada do FLOTRAN CFD (Computational Fluid Dynamic) possui o elemento Fluid141 para análise bidimensional e Fluid142 para análise tridimensional. Para habilitar o elemento, devem-se seguir os seguintes passos:

- Preprocessor > element type add > edit > delete e selecionar o elemento flotran CFD (3D flotran 142 ou 2D flotran 141)

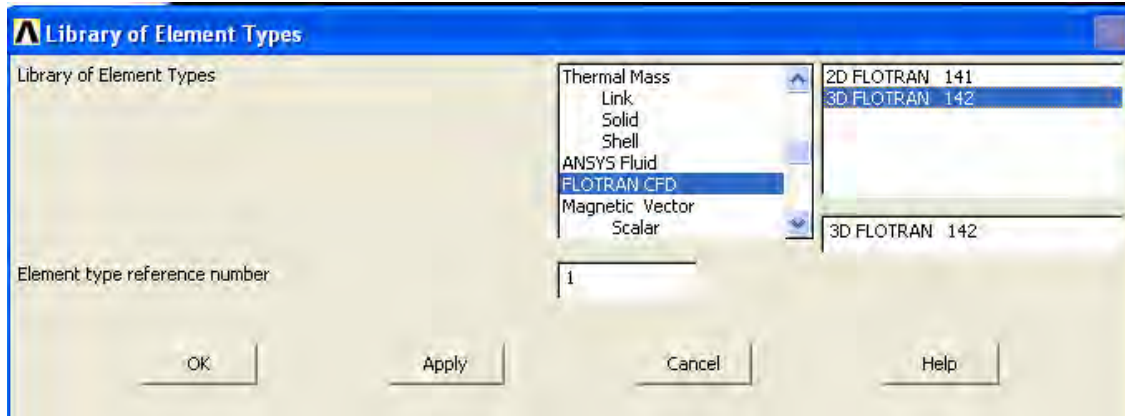


Figura 32 – Escolha do Tipo de Elemento (fluid141 ou fluid142)

Se o elemento escolhido for o elemento fluid 141 a análise numérica a ser utilizada será uma análise bidimensional. Para gerar a área de controle deve seguir os seguintes passos:

- Modeling > create > rectangle > criando assim a área de controle.

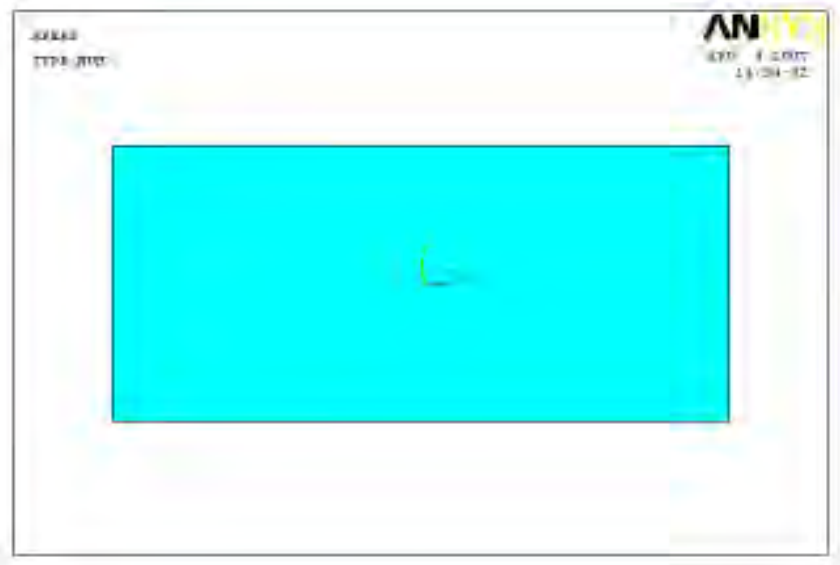


Figura 33 – Discretização da Área de Controle

Se o elemento escolhido for o elemento fluid 142 a análise numérica a ser utilizada será uma análise Tridimensional. Para gerar o volume de controle deve seguir os seguintes passos:

- Modeling > create > volume > block > by dimension > criando assim o volume de controle.

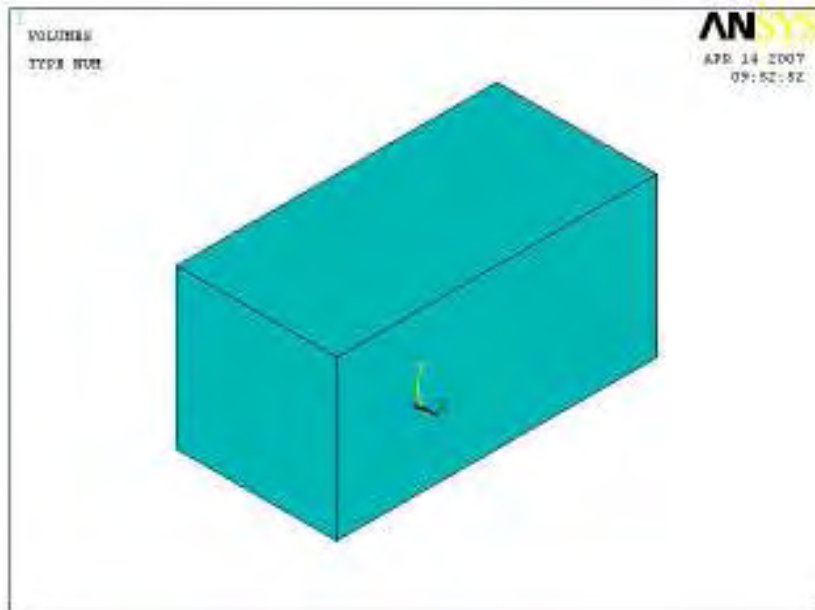


Figura 34 – Discretização do Volume do Controle

Definido as dimensões da área de controle e do volume do controle a ser utilizado, cria-se assim a área ou volume da torre a ser analisada.

- Modeling > create > circle > criando assim o modelo da torre para o caso bidimensional.

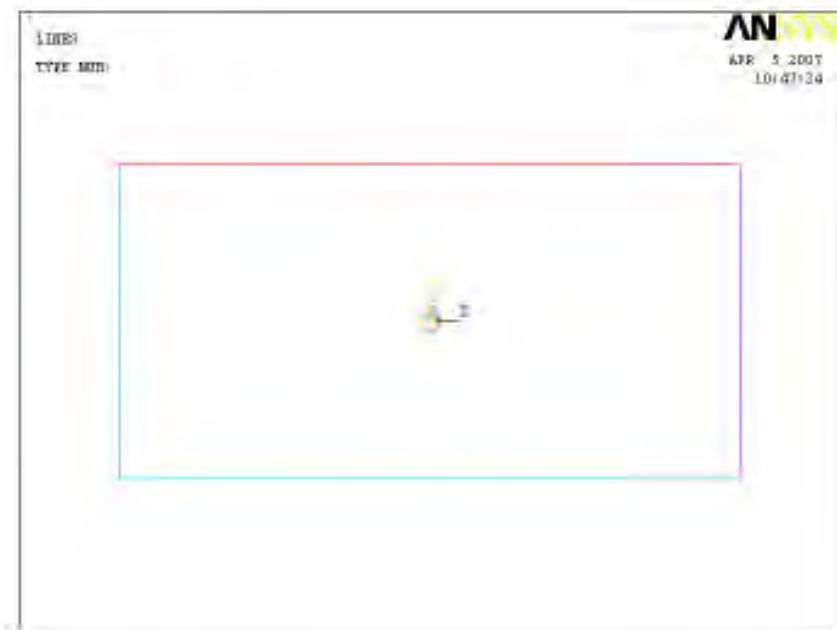


Figura 35 – Criação do Modelo da Torre para a Análise Bidimensional

- Modeling > create > cylinder > by dimension > criando assim o modelo da torre para o caso tridimensional.

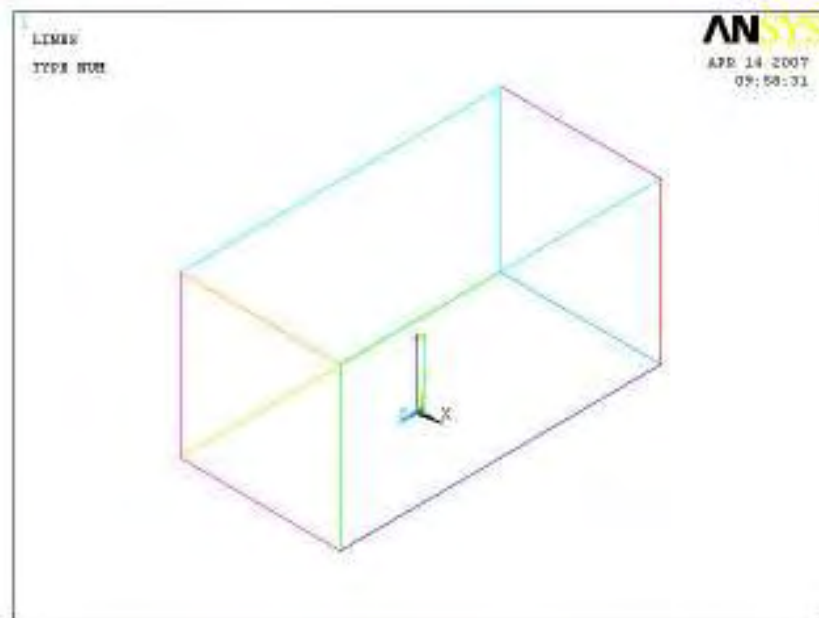


Figura 36 – Criação do Modelo da Torre para a Análise tridimensional

Através das operações booleanas (preprocessor > modeling > operate booleans) subtrai a área ou volume da edificação, da área ou volume de controle.

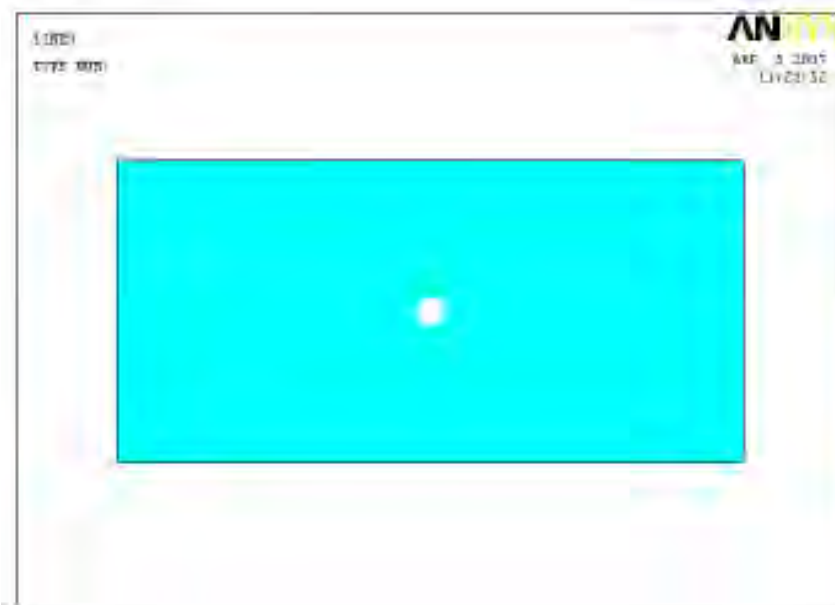


Figura 37 – Operação Booleanas para o Caso Bidimensional

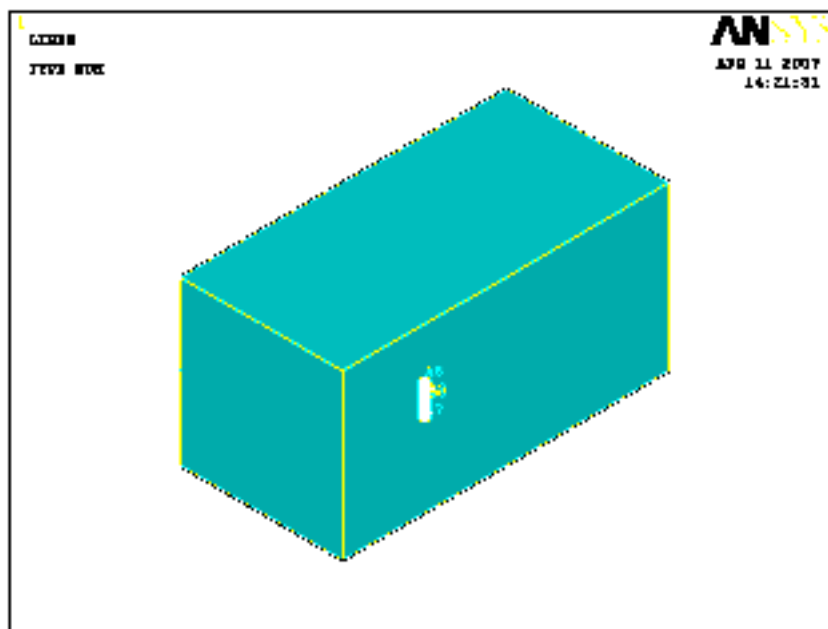


Figura 38 – Operação Booleanas para o Caso Tridimensional

5.2.3. Definição das Características do Fluido e da Discretização das Malhas

Realizados os passos descritos acima, a necessidade de habilitar as características dos fluidos, como densidade, viscosidade e se necessário, condutibilidade, calor específico e emissividade. No caso em estudo, considera-se o fluido onde a torre está inserida, com as seguintes características: fluido turbulento, incompressível, isotérmico, com densidade de 1,225 kg/m³ e viscosidade de 1,79e-005 kg/ms.

Para habilitar as características dos fluidos devem-se seguir os seguintes passos:

- Preprocessor > material props > material models > clicar em CFD e adicionar os valores das características dos fluidos.



Figura 39 – Características do Fluido

Habilitadas as características do fluido, a necessidade de dividir tanto o volume de controle caso a análise seja tridimensional ou a área de controle caso análise seja bidimensional bem como o volume da torre em estudo, isto é feito para começar a definir a malha, quando mais divisões são feitas mais refinadas serão as análises. Para realizar esta etapa a necessidade de se seguir os caminhos:

- Meshing > size contrls > manual size > lines > pickel lines > escolhendo assim o número de divisões a serem feitas.

Feitas as divisões à necessidade de realizar a atribuição da malha:

- Preprocessor > meshing > área > free e clica na área de controle e em seguida em ok, isso se a análise for bidimensional.

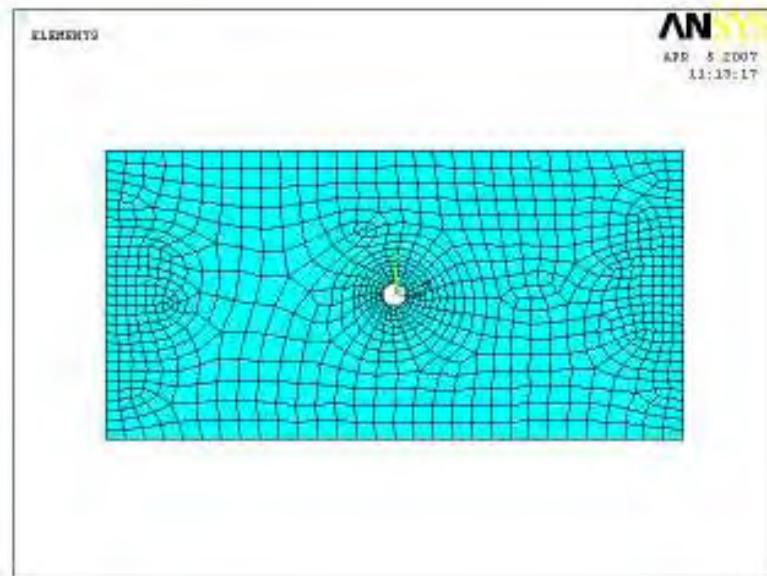


Figura 40 – Discretização da Malha para o Caso Bidimensional

- Preprocessor > meshing > volume > free e clica no volume de controle e em seguida em ok, isso se a análise for tridimensional.

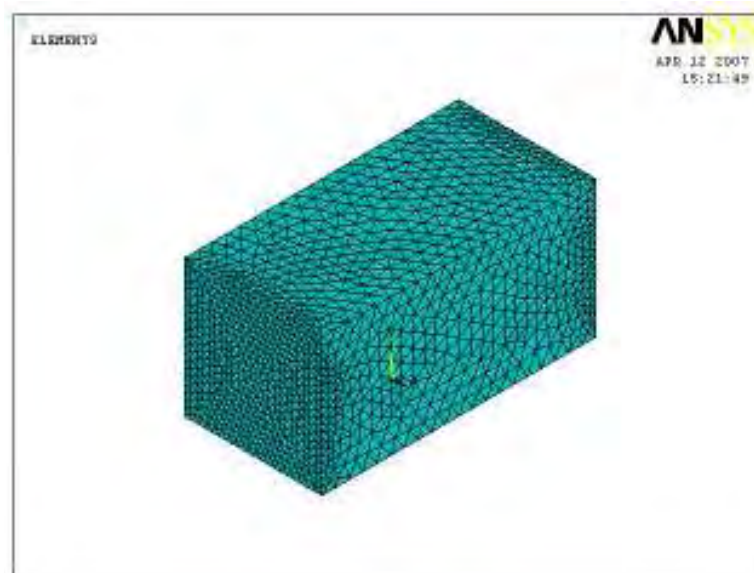


Figura 41 – Discretização da Malha para o Caso Tridimensional

5.2.4. Definição dos Parâmetros da Análise Numérica

Executados todos os passos descritos acima, serão 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. Para realizar as características da análise flotran deve-se seguir os seguintes passos:

- Preprocessor > flotran set up > solution options e habilitar a turbulencia.

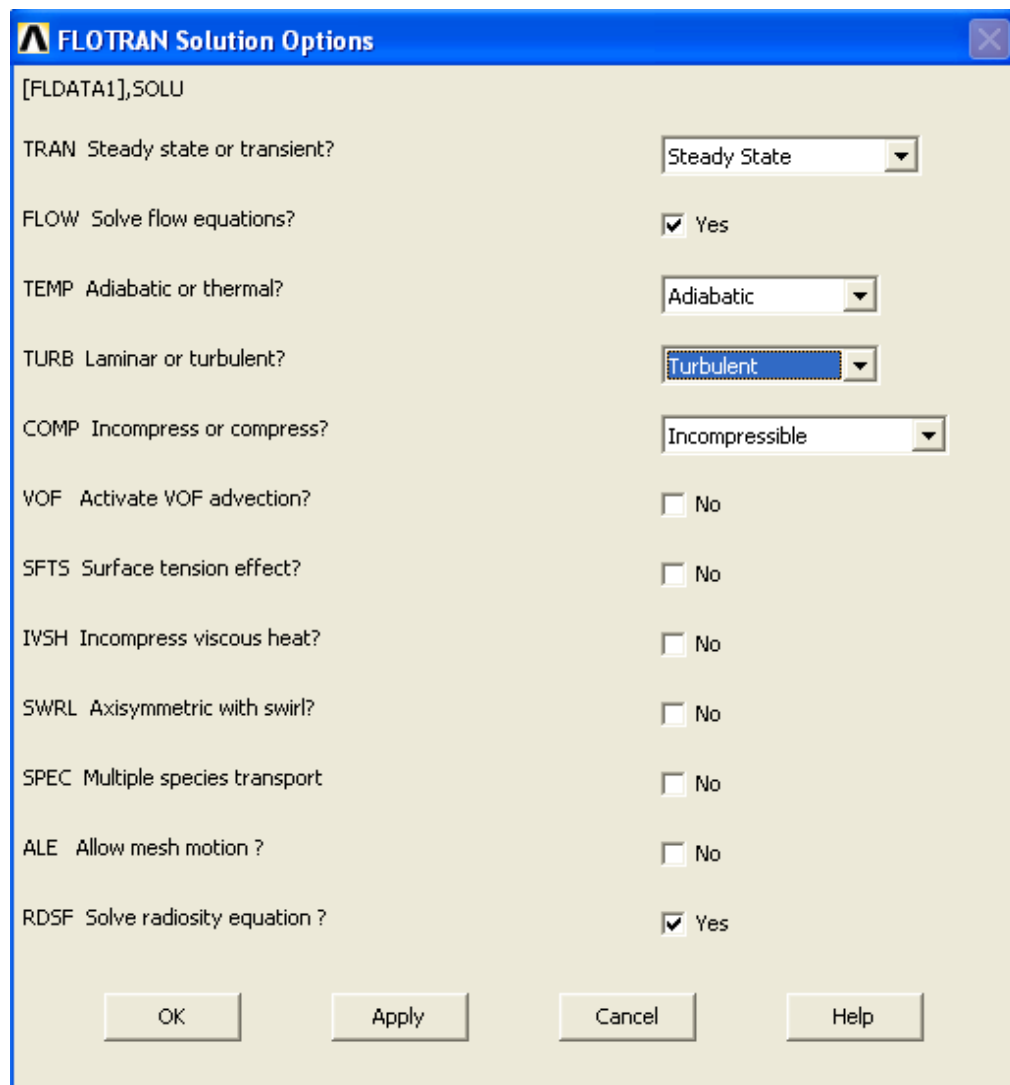


Figura 42 – Escolha da Característica do Fluxo (Turbulenta)

Além de habilitar a turbulência à necessidade de habilitadas às propriedades do fluido:

- Preprocessor > flotrán set up > fluid properties e colocar para a densidade e viscosidade, air-SI.

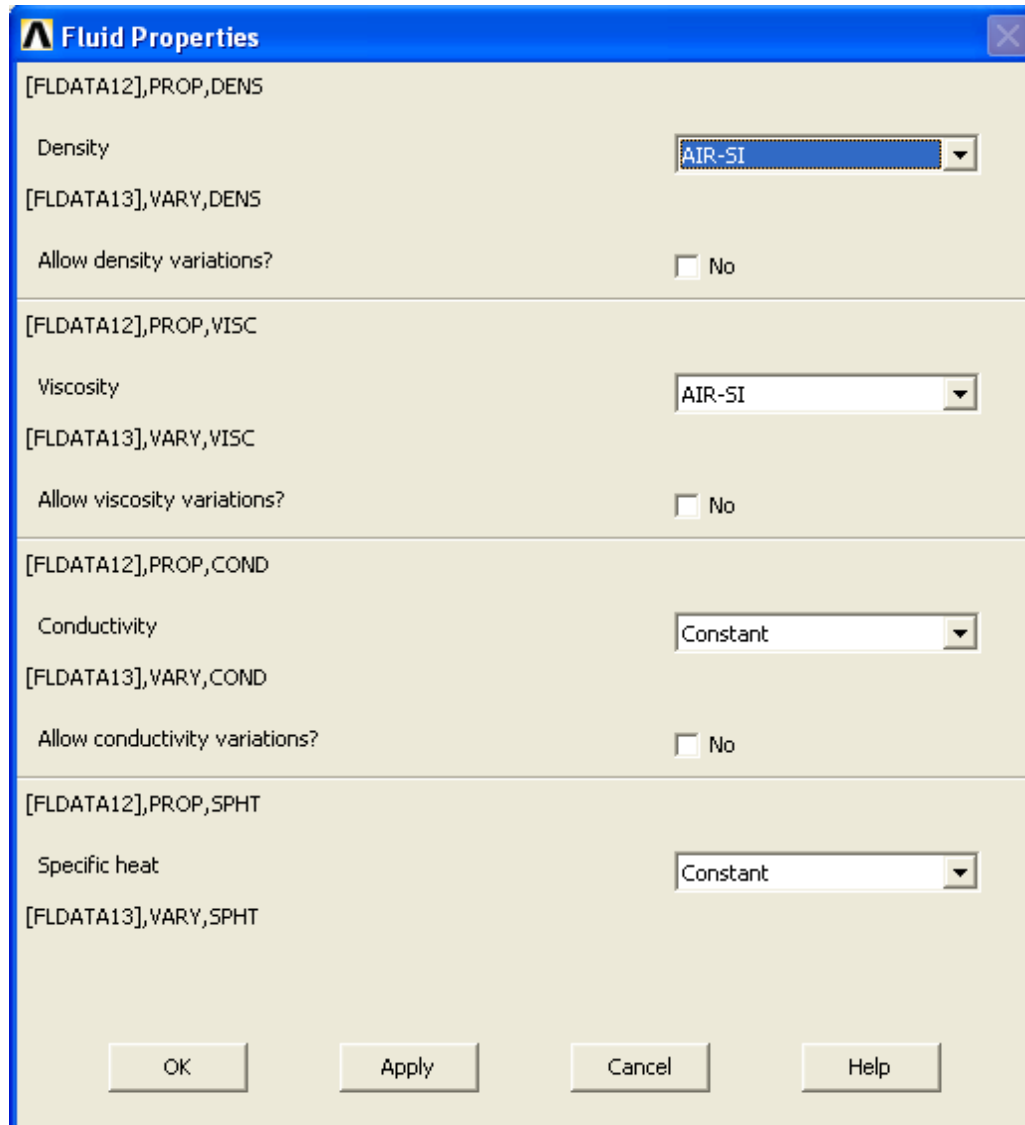


Figura 43 – Propriedades do Fluido (Densidade e Viscosidade)

- **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.

Consideradas às propriedades do fluido, a necessidade de habilitar os coeficientes de pressão:

- Preprocessor > flotran set up > additional out > RFL out derived e habilitar o coeficiente de pressão.

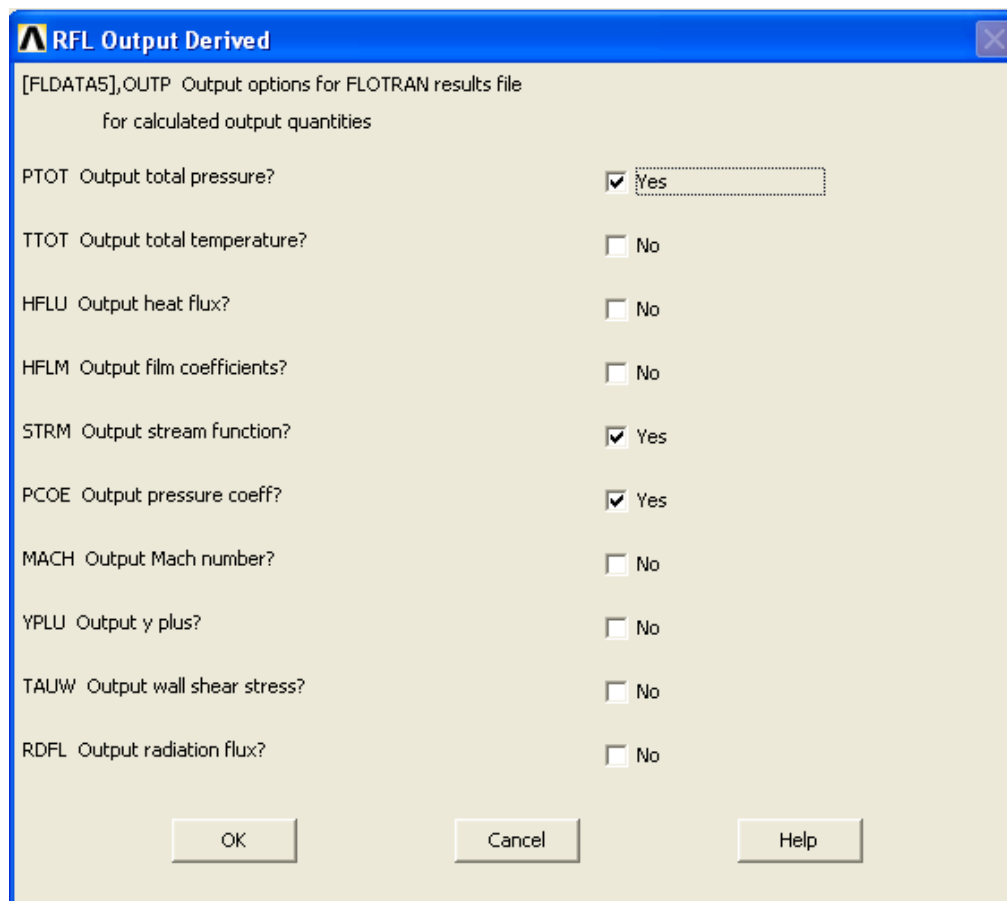


Figura 44 – Habilitando o Coeficiente de Pressão

Habilitados os coeficientes de pressão, deve-se escolher o modelo de turbulência a ser utilizado na análise:

- Preprodessor > flotran set up > turbulence > turbulence model e escolher Standart K-e.

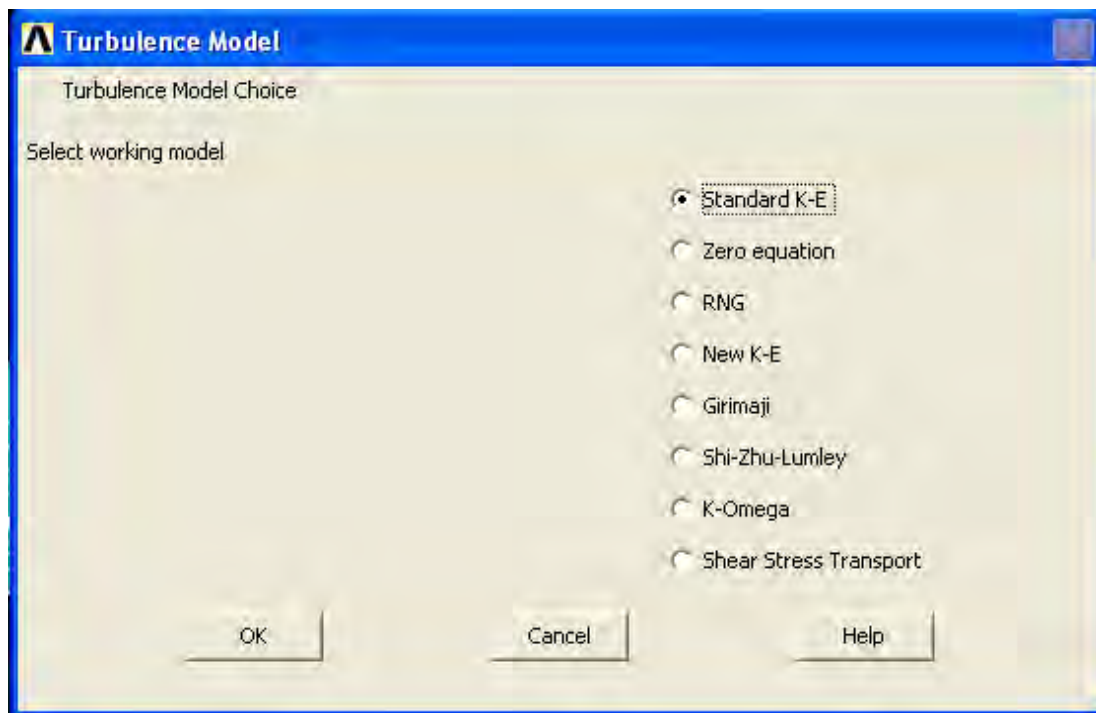


Figura 45 – Escolha do Modelo de Turbulência

5.2.5. Definição das Condições de Contorno

Definidos os parâmetros da análise numérica, a necessidade de adicionar as ações, ou seja, colocar as velocidades e pressões nas respectivas áreas para obter um modelo de superfície livre.

- Preprocessor > loads > apply > fluid/CFD e colocar as velocidades e pressões e em seguida resolver a solução: solution > run flotran.

Apply VELO load on areas

[DA] Apply Velocity Constraints on areas

Apply VX load as a Constant value

If Constant value then:
VX Load value

Apply VY load as a Constant value

If Constant value then:
VY a Load value

Apply VZ load as a Constant value

If Constant value then:
VZ Load value

Apply to boundary lines? Yes

Moving wall? No

Generalized Symmetry? No

NOTE: Blank values not interpreted as 0's !!!

OK Cancel Help

Figura 46 – Habilitação das Velocidades

Apply PRES on areas

[DA] Apply PRES on areas as a Constant value

If Constant value then:
PRES Pressure value

Apply to boundary lines? Yes

OK Apply Cancel Help

Figura 47 – Habilitação das Pressões

Para a simulação do modelo superfície livre, foram aplicadas as seguintes condições de contorno na área de controle para a análise bidimensional:

- Na linha a montante, na direção do vento a velocidade de entrada do vento $V_x = 40$ m/s.
- Na torre, $V_x = V_y = 0$ (condição de não deslizamento).
- Nas duas linhas laterais e na linha do fundo, a pressão é igual à zero.

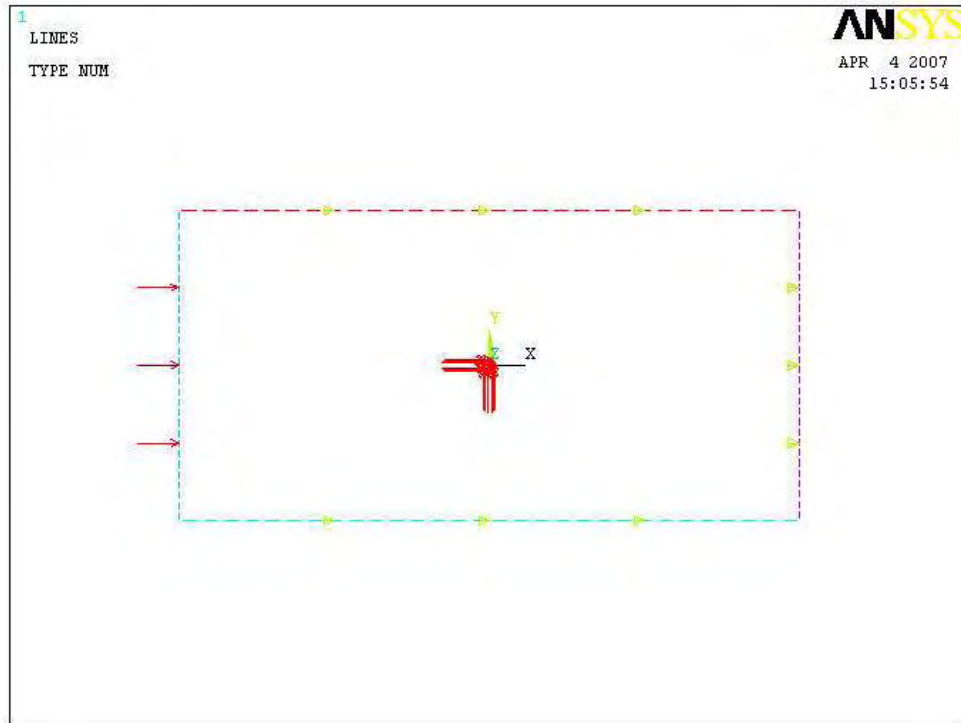


Figura 48 – Condições de Contorno para o Caso Bidimensional

E as seguintes condições de contorno para o volume de controle para análise tridimensional:

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

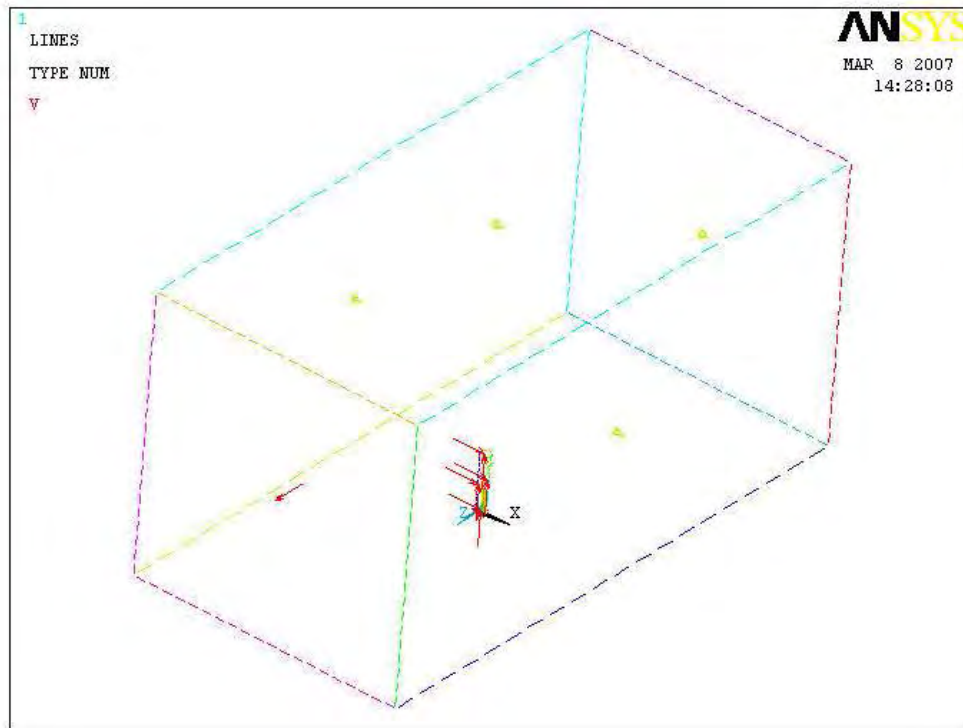


Figura 49 – Condições de Contorno para o Caso Tridimensional

5.3. Apresentação dos Resultados da Análise Numérica

Resolvida à solução, à necessidade de definir o plano onde se deseja obter a velocidade, as pressões e os coeficientes externos de pressão:

- Plotctrls > style > hidden line options e na caixa onde esta o type of plot (z-buffered, colocar Q – slice z buffer).

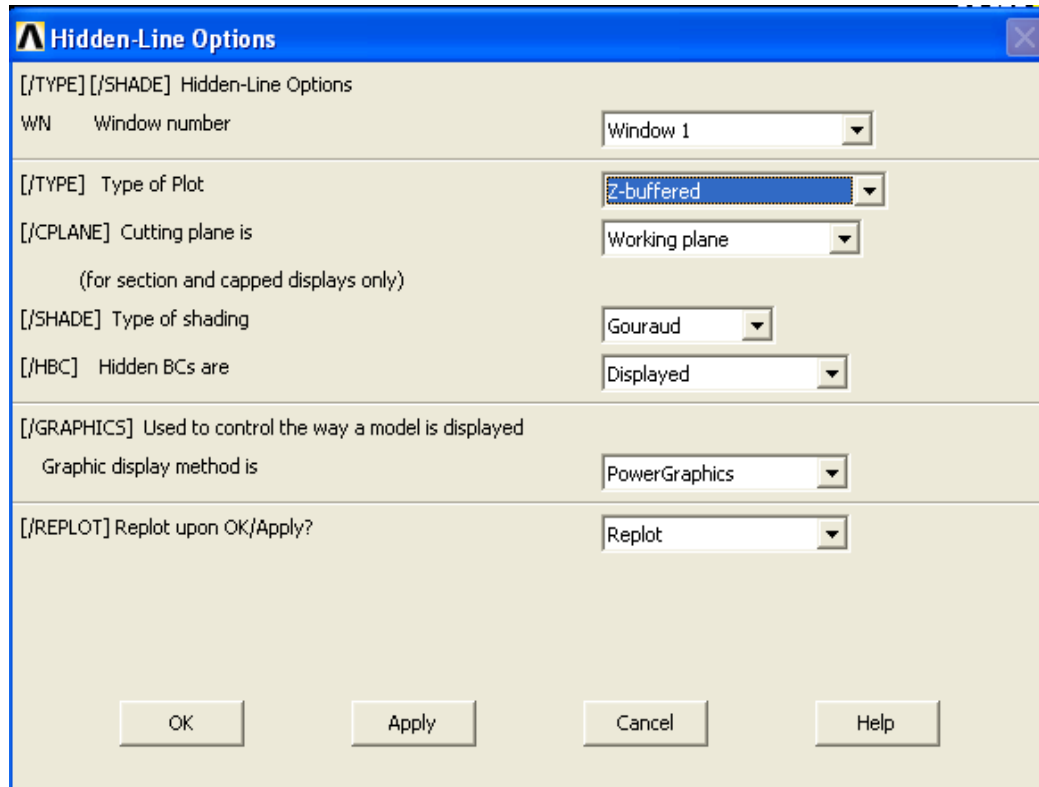


Figura 50 – Definição do Plano onde se Deseja Obter os Coeficientes de Pressão

Resolvida à solução e definido o plano onde se deseja obter velocidade, as pressões e os coeficientes externos de pressão, o próximo passo é realizar a 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 se deseja analisar.

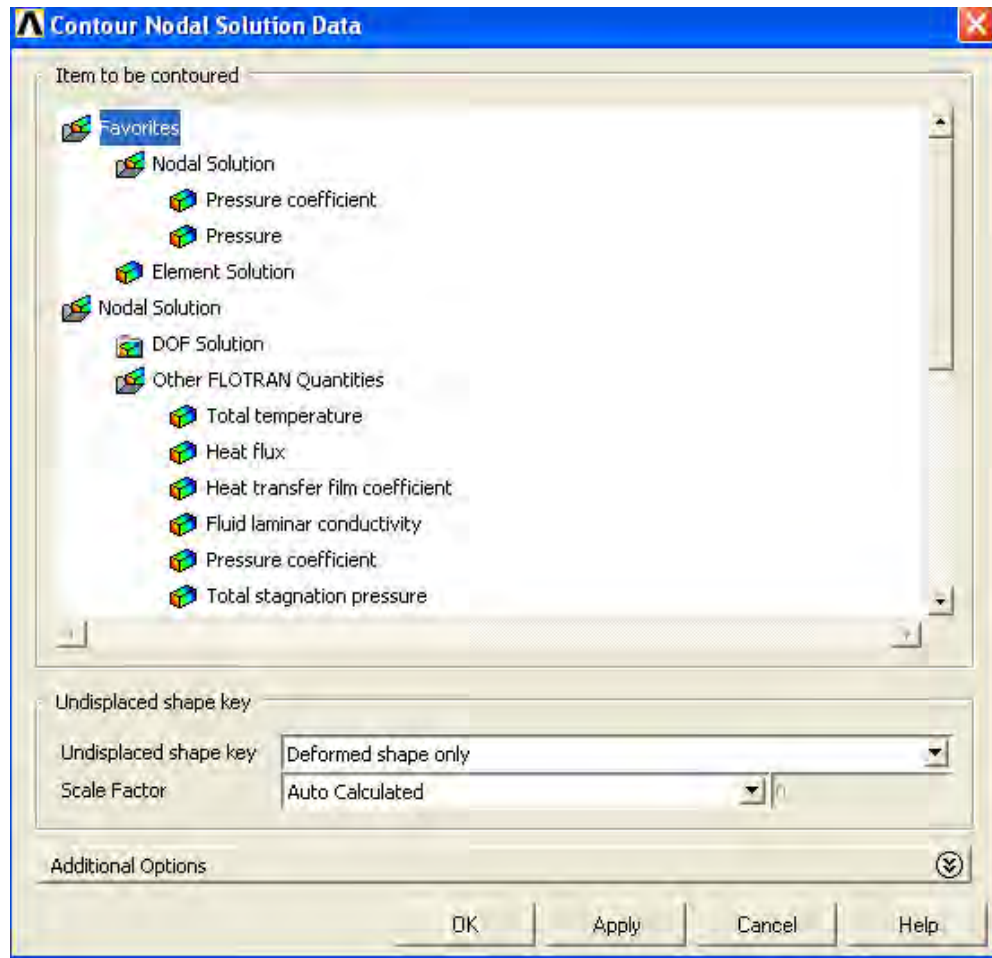


Figura 51 – Análise das Soluções

Para obter o campo de vetor velocidade (m/s):

- General postproc > read results > last set ou by pick depois ir em plot results > contour plot > nodal solution > DOF > Fluid velocity.

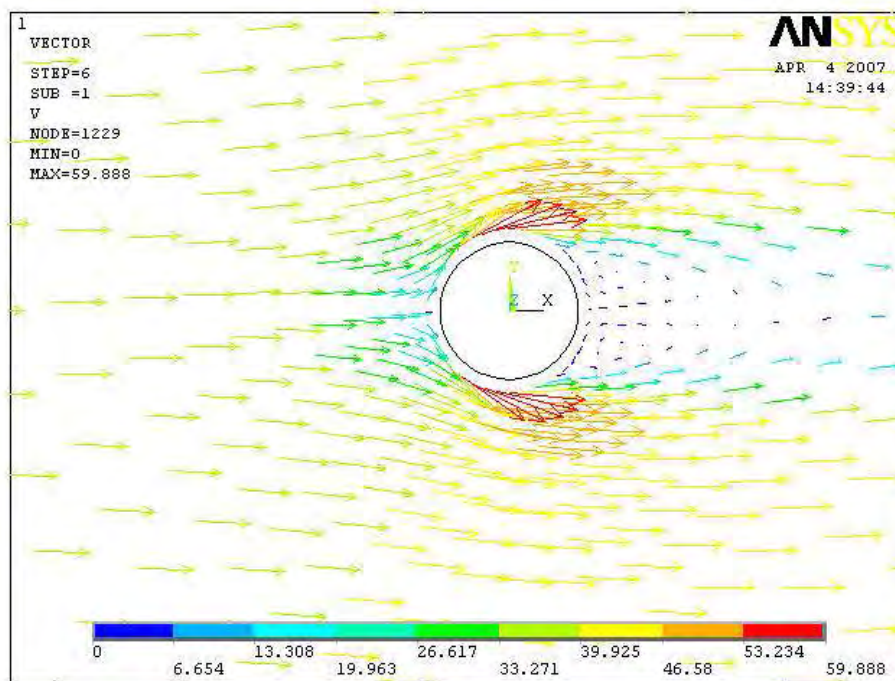


Figura 52 – Campo de Vetor Velocidade (m/s) da Análise Bidimensional

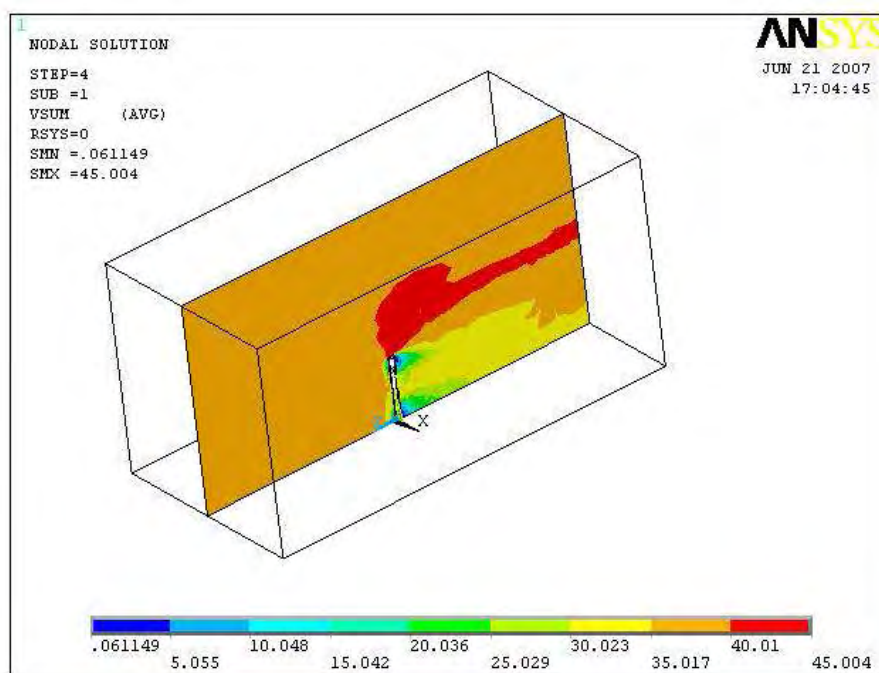


Figura 53 – Campo de Velocidade (m/s) em um Plano Longitudinal da Análise Tridimensional

Para obter os coeficientes externos de pressão, a necessidade de analisar o caminho para obter os coeficientes de pressão:

- General postproc > path operations > define path > on working plane > circular path pois a seção das torres são circular.
- Atribuir o caminho > map onto path > other quantities e escolhe pressure coefficient > depois ir em recall path e selecionar a opção desejada para análise > plot paths item e selecionar a opção desejada.

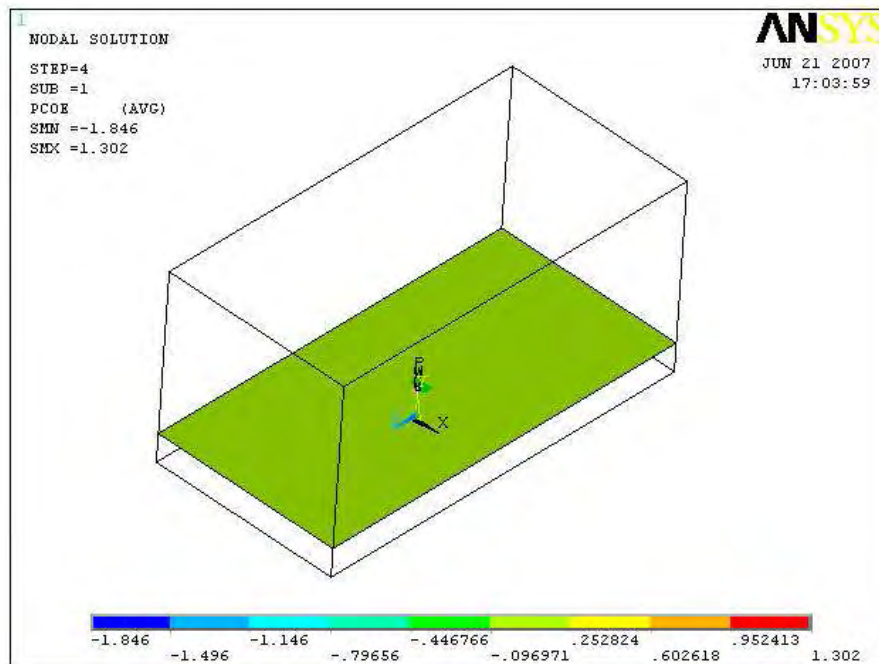


Figura 54 – Coeficientes Externos de Pressão a uma Altura de 7.5 metros

6. ENSAIOS NUMÉRICOS

A área de controle utilizada neste estudo foi definida com proporções tais que a distância tanto na direção horizontal como na direção vertical não interfira na simulação numérica dos resultados. A área de controle em estudo possui as seguintes dimensões:

- Na direção horizontal (eixos das abscissas) possui um comprimento de 10 vezes maior ao maior diâmetro da torre utilizado na análise bidimensional.
- Na direção vertical (eixos das ordenadas) possui um comprimento de 5 vezes maior ao maior diâmetro da torre utilizado na análise bidimensional.

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 não interfira na simulação numérica dos resultados, visto que proporções menores influenciam nas distribuições das pressões. O volume de controle utilizado para a realização dos ensaios numéricos possui as seguintes dimensões:

- Na direção horizontal (eixos das abscissas) possui um comprimento de 5 vezes maior ao maior diâmetro da torre utilizado na análise tridimensional.
- Na direção vertical (eixos das abscissas) possui um comprimento de 5 vezes maior ao maior diâmetro da torre utilizado na análise tridimensional.
- Na direção z possui um comprimento de 10 vezes maior ao maior diâmetro da torre utilizado na análise tridimensional, direção esta que estará sujeita a uma velocidade de 40 m/s.

As figuras 55, 56 ilustram os coeficientes de pressão e a pressão em (N/m^2) para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise bidimensional, sendo em x a direção do vento.

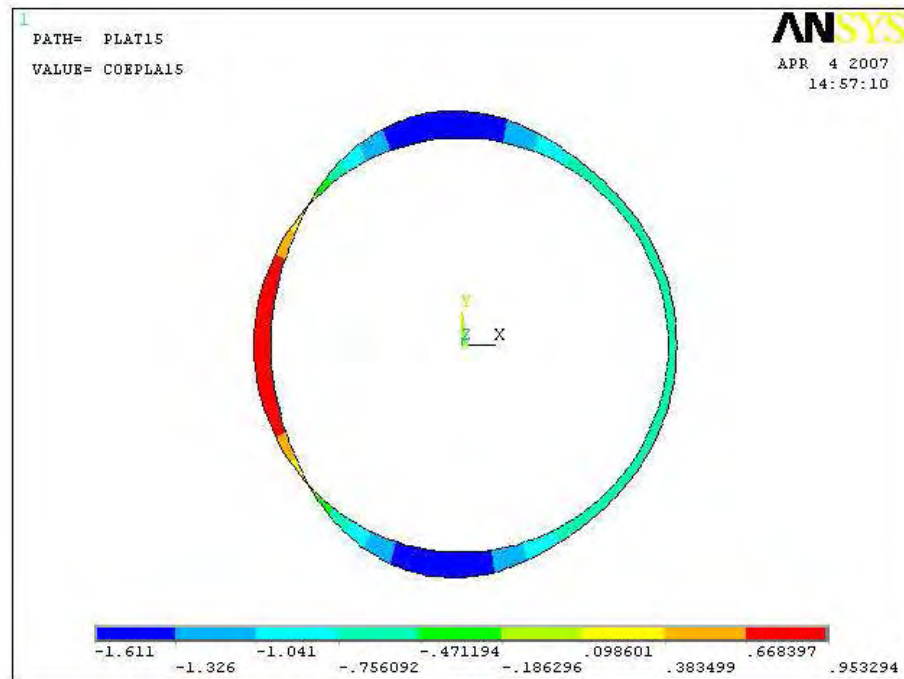


Figura 55 – Coeficiente Externo de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros

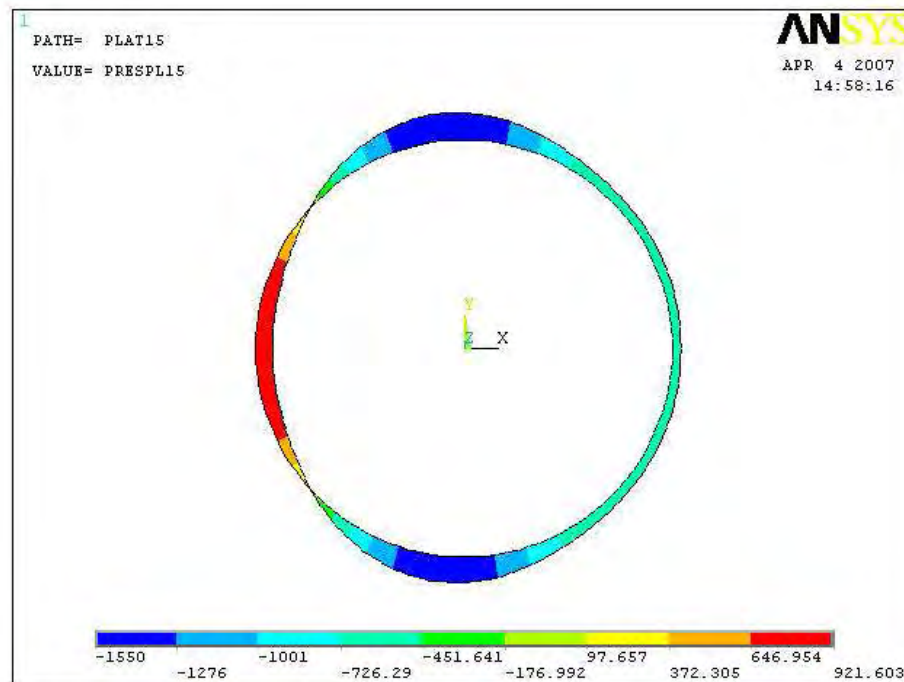


Figura 56 – Pressão (N/m²) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros

A figura 57 ilustra os coeficientes de pressões para $h = 0$ metros de altura (no chão) para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise tridimensional, sendo em z a direção do vento.

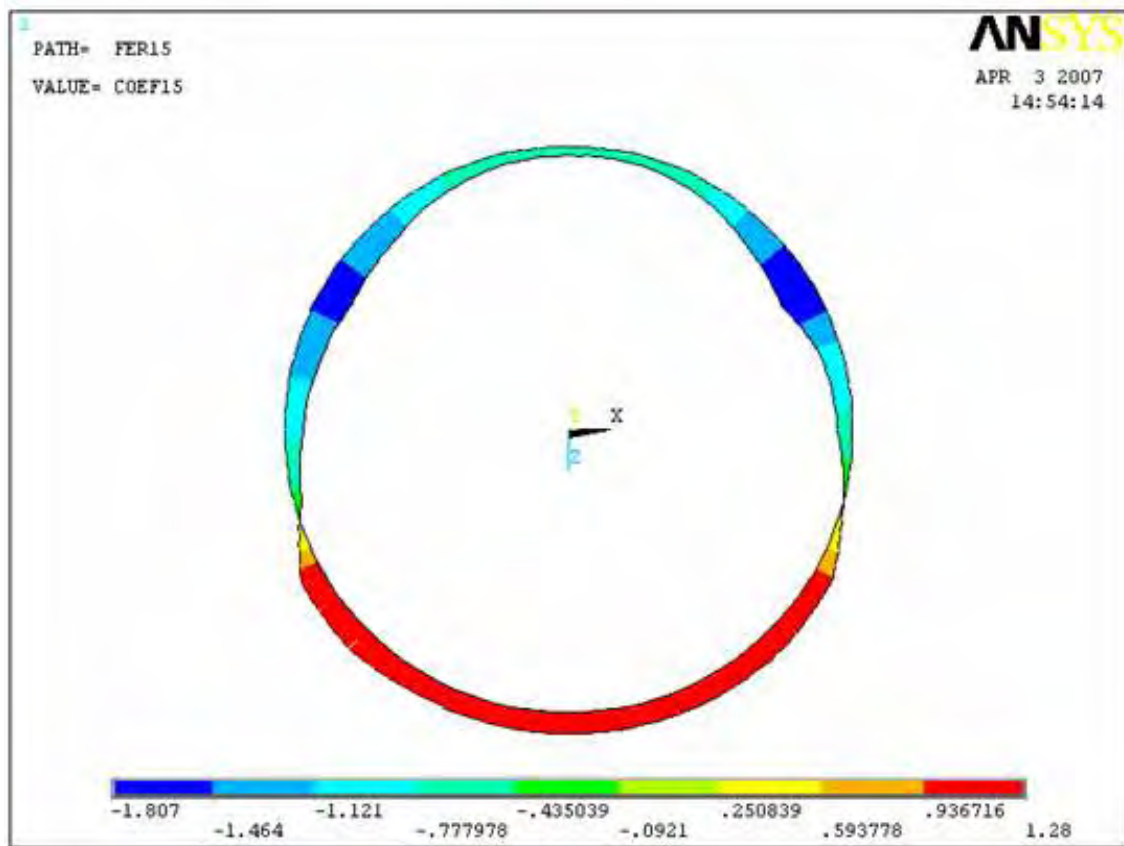


Figura 57 – Coeficiente Externo de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 metros em um Plano de Referência de zero Metros de Altura (Chão)

A figura 58 ilustra a pressão em (N/m^2) para $h = 0$ metros de altura (no chão) para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise tridimensional, sendo em z a direção do vento.

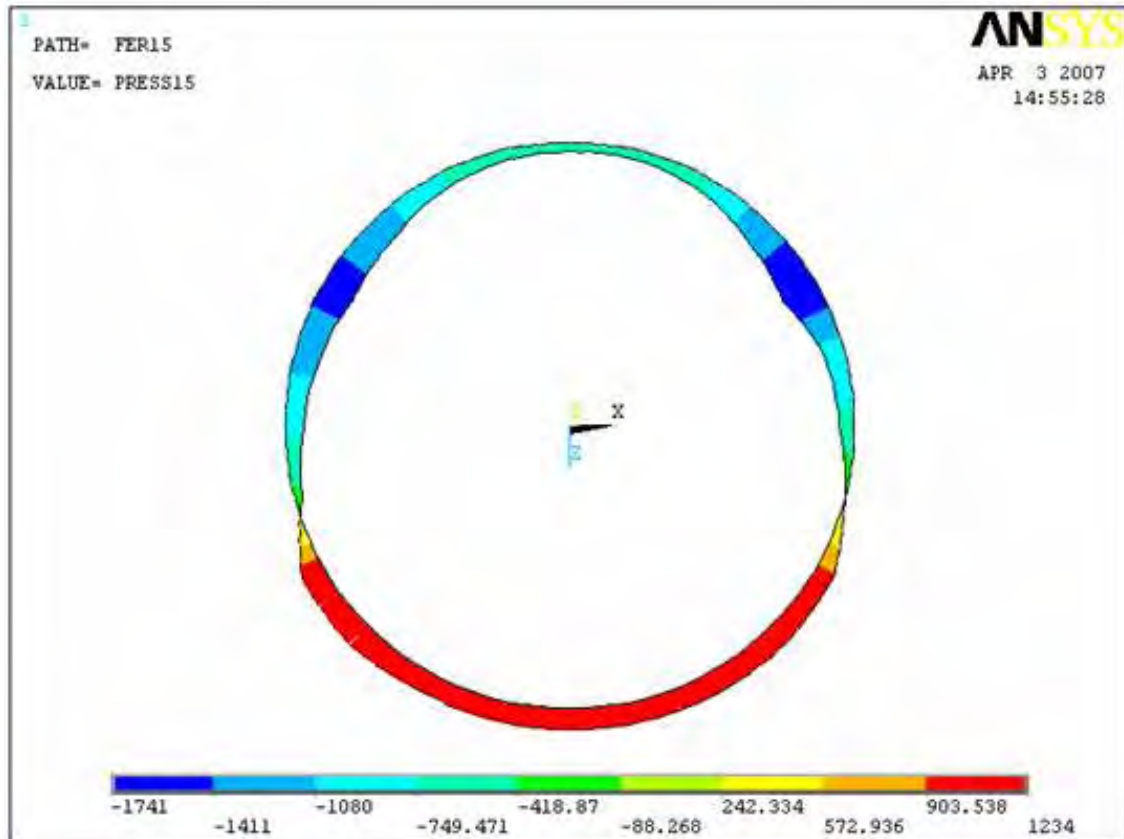


Figura 58 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de zero Metros de Altura (Chão)

A figura 59 ilustra os coeficientes de pressão para $h = 5$ metros de altura para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise tridimensional.

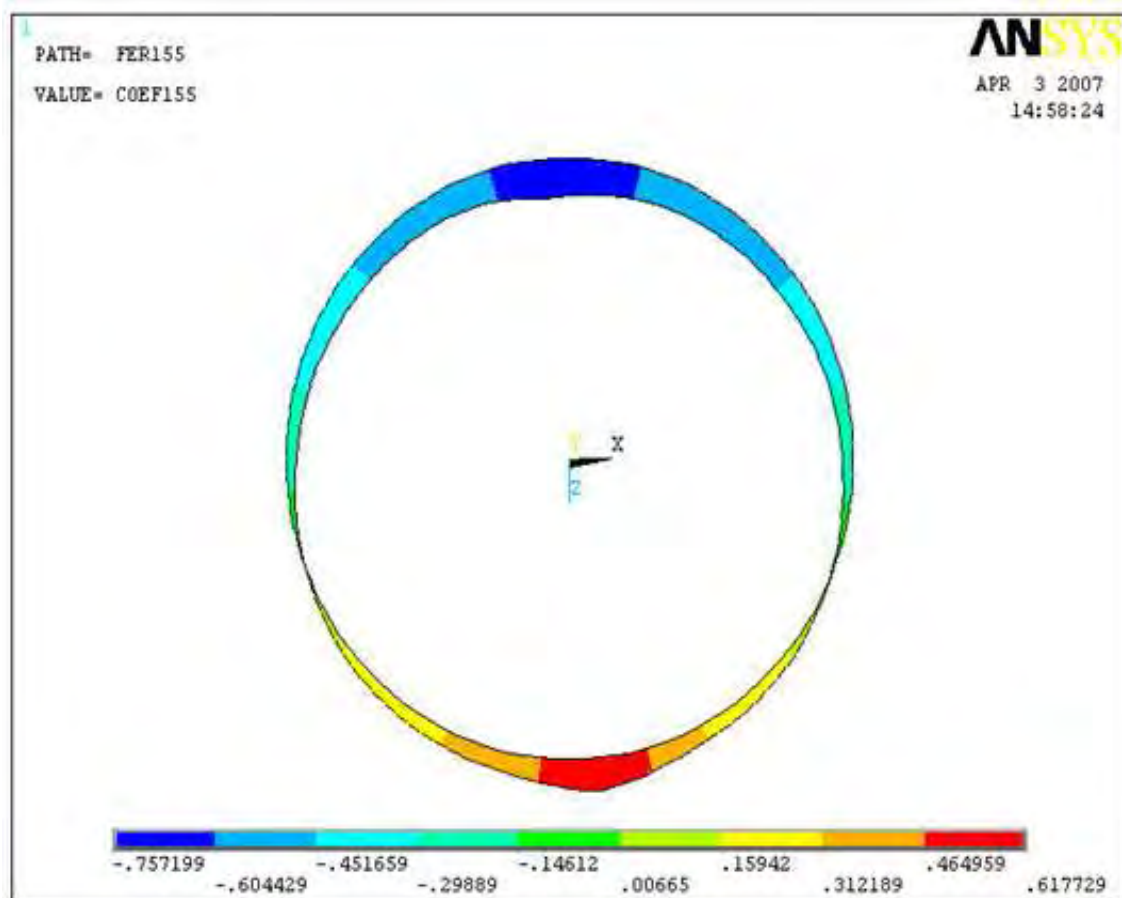


Figura 59 – Coeficiente Externo de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 5 Metros de Altura

A figura 60 ilustra a pressão em (N/m^2) para $h = 5$ metros de altura (no chão) para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise tridimensional, sendo em z a direção do vento.

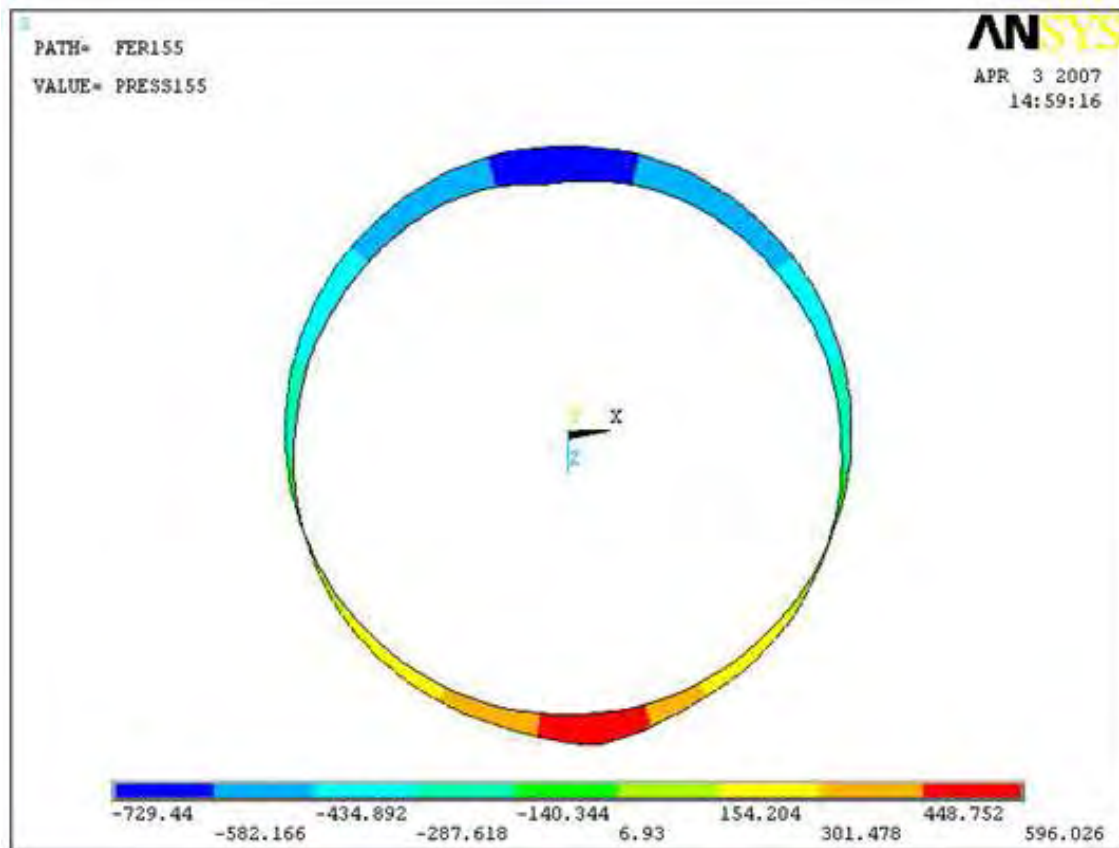


Figura 60 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 5 Metros de Altura

A figura 61 ilustra os coeficientes de pressão para $h = 10$ metros de altura para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise tridimensional.

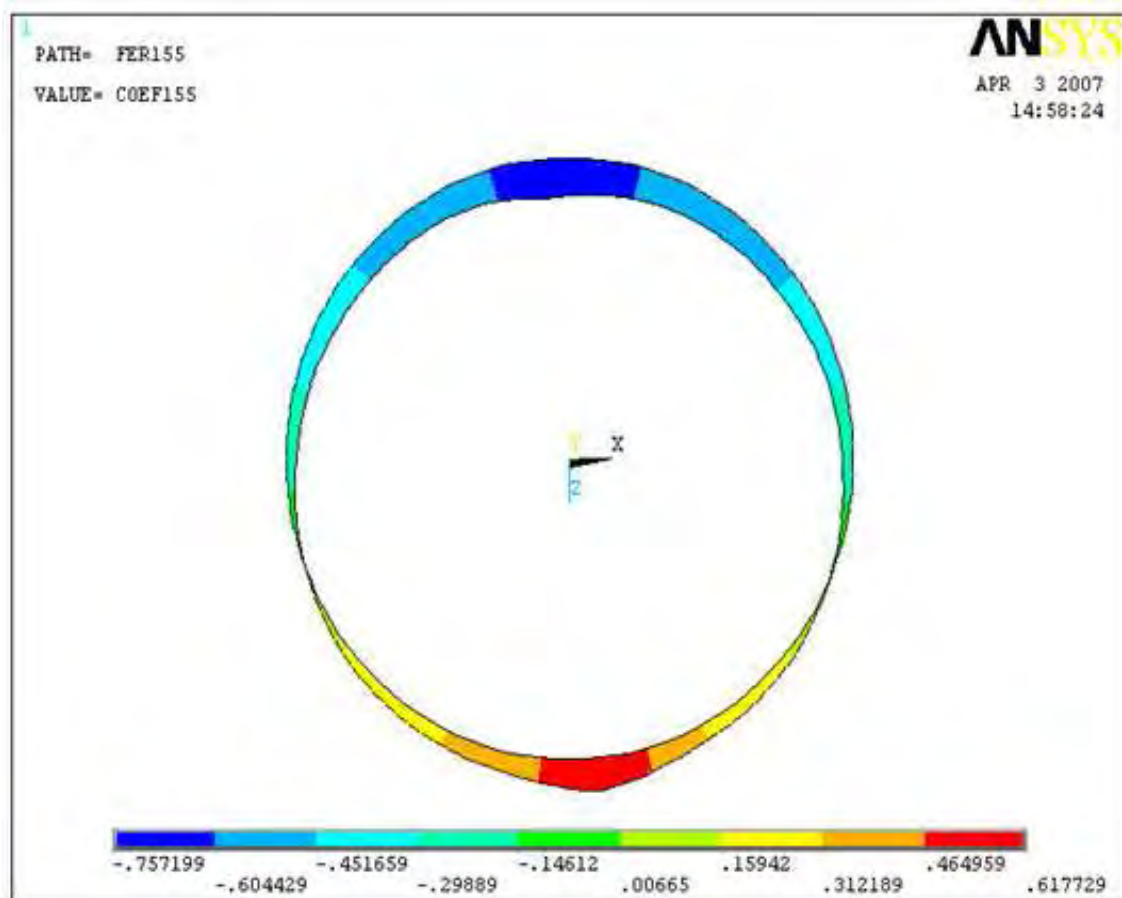


Figura 61 – Coeficiente Externo de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 10 Metros de Altura

A figura 62 ilustra a pressão em (N/m^2) para $h = 10$ metros de altura (no chão) para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise tridimensional, sendo em z a direção do vento.

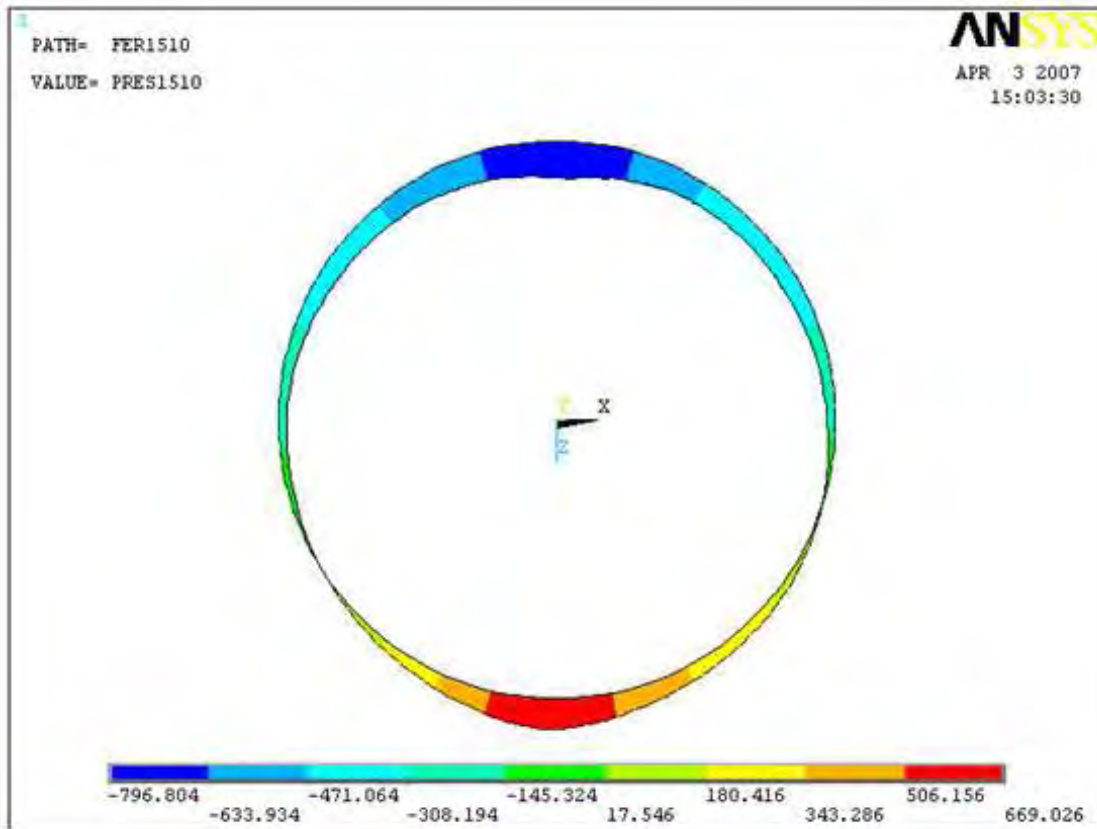


Figura 62 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 10 Metros de Altura

A figura 63 ilustra os coeficientes de pressão para $h = 14$ metros de altura para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 0.75 metros da análise tridimensional.

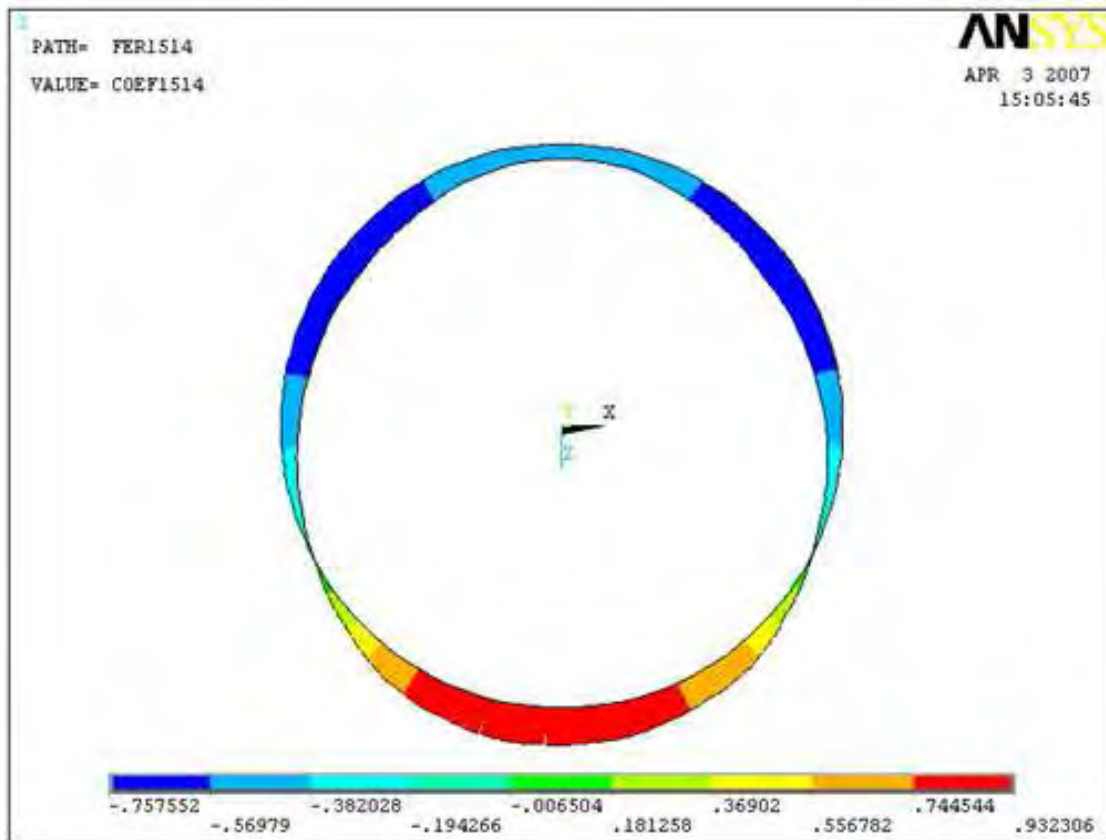


Figura 63 – Coeficiente Externo de Pressão no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros num Plano de Referência de 14 Metros de Altura

A figura 64 ilustra a pressão em (N/m^2) para $h = 14$ metros de altura (no chão) para a relação $h/d = 10$ de uma torre de 15 metros de altura e de diâmetro igual a 1.50 metros da análise tridimensional, sendo em z a direção do vento.

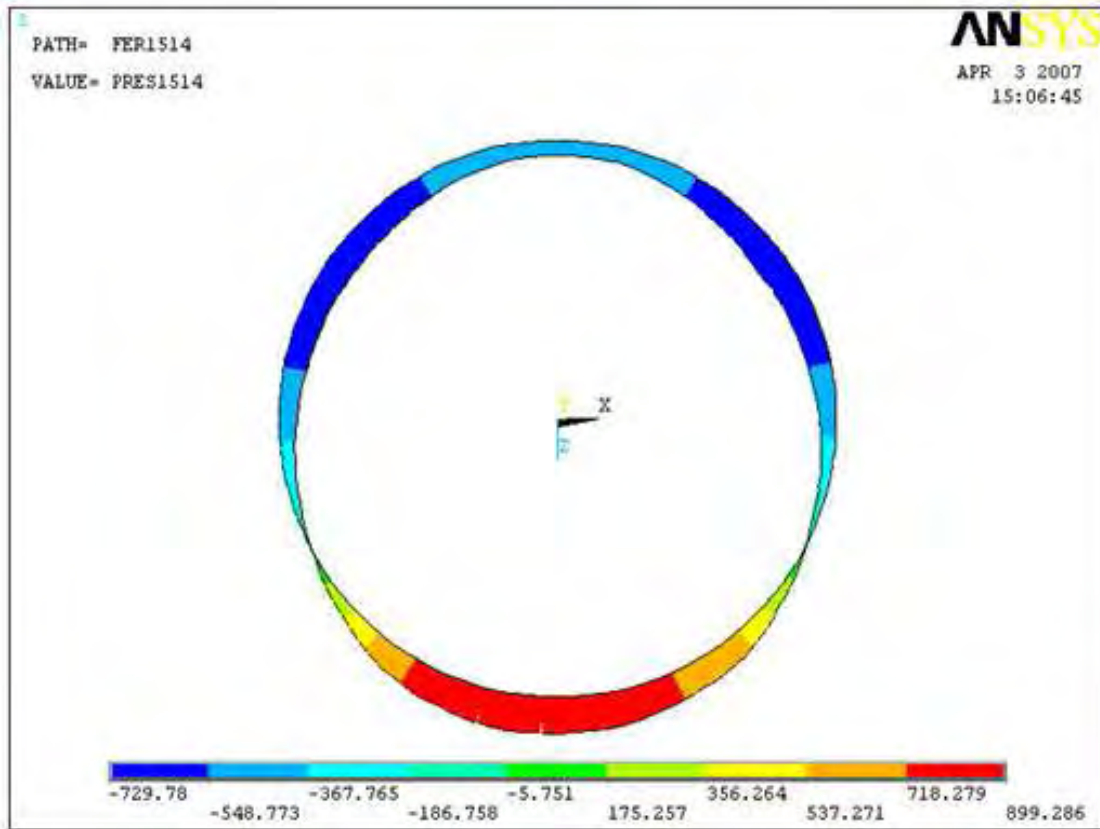


Figura 64 – Pressão (N/m^2) no Perímetro da Torre de Seção Circular com Diâmetro de 1.50 Metros em um Plano de Referência de 14 Metros de Altura

7. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Neste item será feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo programa ANSYS e os valores obtidos da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.18), para os coeficientes de pressão e pressão tanto para a análise bidimensional como para a análise tridimensional.

7.1. Análise Bidimensional

- Torre de diâmetro igual a 1.00 metros

Tabela 2 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros

β	Superfície lisa - $H/d \leq 10$			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m^2)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,96	980,80	925,90
10°	0,90	0,95	882,70	914,90
20°	0,70	0,85	715,90	802,40
30°	0,35	0,54	343,28	528,40
40°	0,00	0,17	0,00	174,50
50°	-0,70	-0,40	-686,60	-327,02
60°	-1,20	-0,86	-1176,90	-831,70
70°	-1,40	-1,30	-1373,10	-1247,60
80°	-1,45	-1,50	-1422,20	-1447,90
90°	-1,40	-1,52	-1373,10	-1467,70
100°	-1,10	-1,25	-1078,90	-1237,70
120°	-0,60	-0,72	-588,48	-694,50
140°	-0,35	-0,54	-343,28	-527,70
160°	-0,35	-0,51	-343,28	-499,80
180°	-0,35	-0,48	-343,28	-464,30

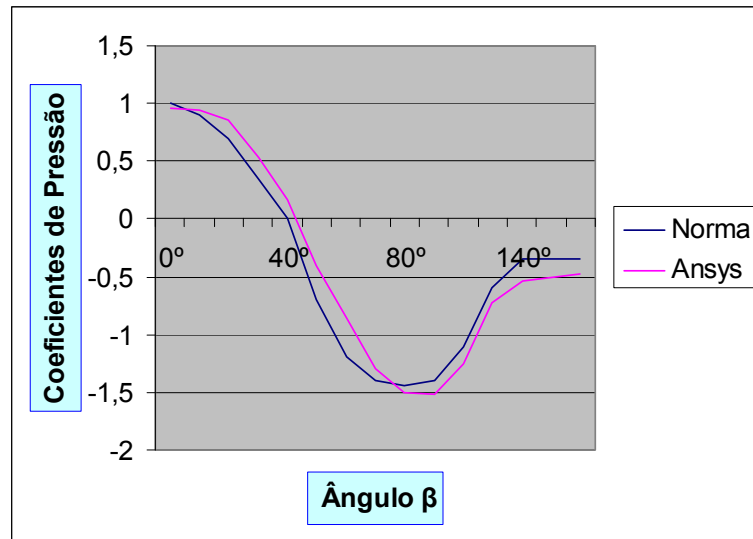


Gráfico 1: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 1.50 metros

Tabela 3 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	921,60
10°	0,90	0,92	882,70	892,10
20°	0,70	0,84	715,90	823,00
30°	0,35	0,54	343,28	523,00
40°	0,00	0,13	0,00	129,78
50°	-0,70	-0,34	-686,60	-333,50
60°	-1,20	-0,87	-1176,90	823,34
70°	-1,40	-1,25	-1373,10	1226,54
80°	-1,45	-1,50	-1422,20	1471,20
90°	-1,40	-1,50	-1373,10	-1445,60
100°	-1,10	-1,26	-1078,90	1217,80
120°	-0,60	-0,70	-588,48	-673,70
140°	-0,35	-0,55	-343,28	-531,50
160°	-0,35	-0,50	-343,28	-484,70
180°	-0,35	-0,48	-343,28	-463,20

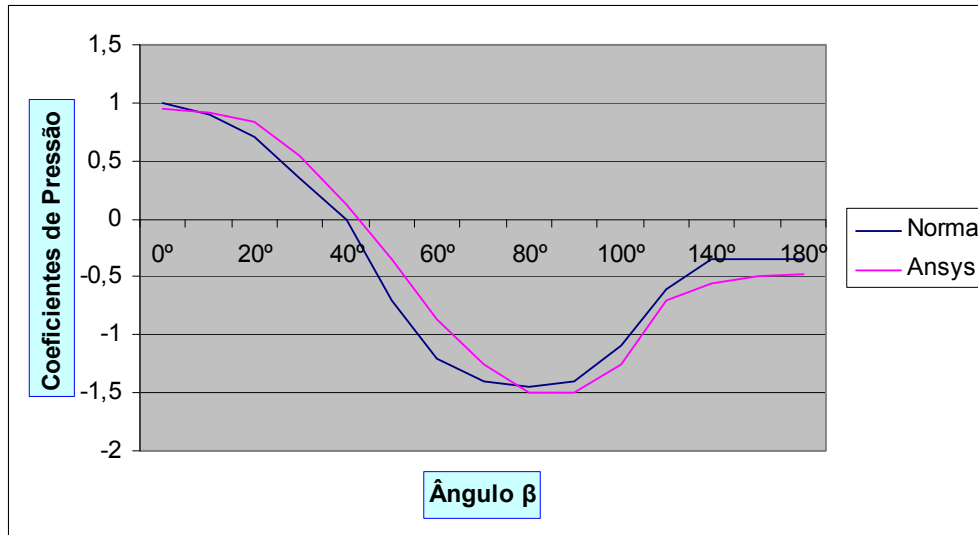


Gráfico 2: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 2.00 metros

Tabela 4 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	919,70
10°	0,90	0,92	882,70	909,40
20°	0,70	0,75	715,90	732,98
30°	0,35	0,54	343,28	524,70
40°	0,00	0,12	0,00	112,50
50°	-0,70	-0,34	-686,60	-333,50
60°	-1,20	-0,90	-1176,90	-1167,40
70°	-1,40	-1,25	-1373,10	-1275,60
80°	-1,45	-1,47	-1422,20	1421,50
90°	-1,40	-1,47	-1373,10	-1421,50
100°	-1,10	-1,25	-1078,90	-1142,50
120°	-0,60	-0,70	-588,48	-662,40
140°	-0,35	-0,54	-343,28	-523,60
160°	-0,35	-0,50	-343,28	-486,40
180°	-0,35	-0,50	-343,28	-465,30

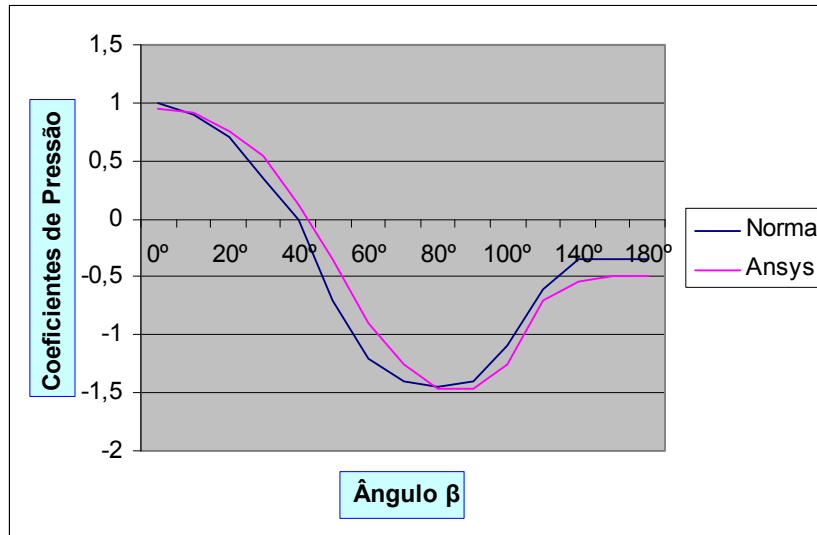


Gráfico 3: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 2.50 metros

Tabela 5 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	922,01
10°	0,90	0,92	882,70	912,80
20°	0,70	0,80	715,90	764,68
30°	0,35	0,53	343,28	522,76
40°	0,00	0,14	0,00	137,30
50°	-0,70	-0,33	-686,60	-323,60
60°	-1,20	-0,90	-1176,90	879,40
70°	-1,40	-1,25	-1373,10	-1229,40
80°	-1,45	-1,50	-1422,20	-1465,80
90°	-1,40	-1,50	-1373,10	-1439,00
100°	-1,10	-1,20	-1078,90	-1156,90
120°	-0,60	-0,70	-588,48	-620,98
140°	-0,35	-0,54	-343,28	-522,44
160°	-0,35	-0,50	-343,28	-490,90
180°	-0,35	-0,50	-343,28	-463,20

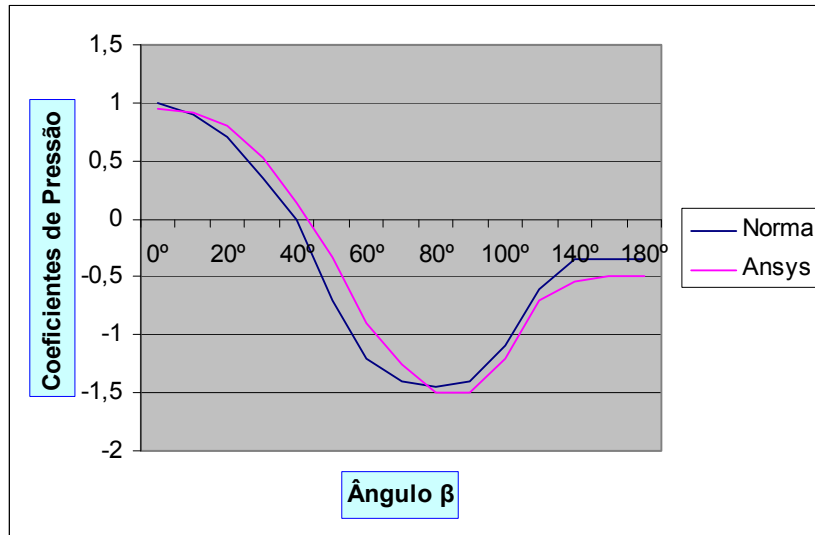


Gráfico 4: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 3.00 metros

Tabela 6 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,94	980,80	912,00
10°	0,90	0,90	882,70	883,50
20°	0,70	0,83	715,90	814,06
30°	0,35	0,74	343,28	722,86
40°	0,00	0,35	0,00	343,28
50°	-0,70	0,10	-686,60	98,08
60°	-1,20	-0,36	-1176,90	-341,15
70°	-1,40	-0,80	-1373,10	-686,80
80°	-1,45	-1,00	-1422,20	911,20
90°	-1,40	-1,20	-1373,10	-1154,40
100°	-1,10	-1,10	-1078,90	-1097,40
120°	-0,60	-0,90	-588,48	-819,40
140°	-0,35	-0,65	-343,28	-622,64
160°	-0,35	-0,60	-343,28	-564,60
180°	-0,35	-0,57	-343,28	-543,85

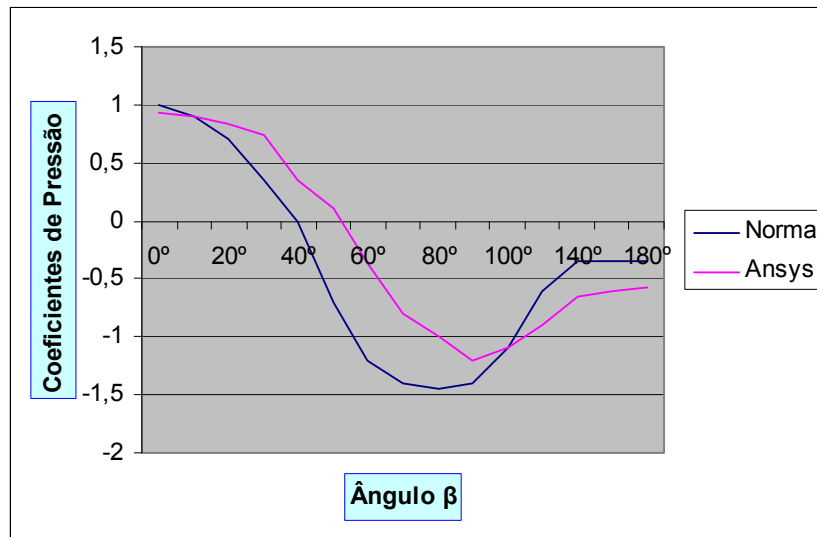


Gráfico 5: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 3.50 metros

Tabela 7 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	922,92
10°	0,90	0,92	882,70	911,90
20°	0,70	0,75	715,90	754,20
30°	0,35	0,54	343,28	531,91
40°	0,00	0,14	0,00	127,50
50°	-0,70	-0,42	-686,60	-393,20
60°	-1,20	-0,85	-1176,90	-814,40
70°	-1,40	-1,25	-1373,10	-1140,60
80°	-1,45	-1,50	-1422,20	-1364,70
90°	-1,40	-1,50	-1373,10	-1414,70
100°	-1,10	-1,20	-1078,90	-1230,40
120°	-0,60	-0,68	-588,48	-649,80
140°	-0,35	-0,50	-343,28	-501,30
160°	-0,35	-0,50	-343,28	-470,30
180°	-0,35	-0,50	-343,28	-446,48

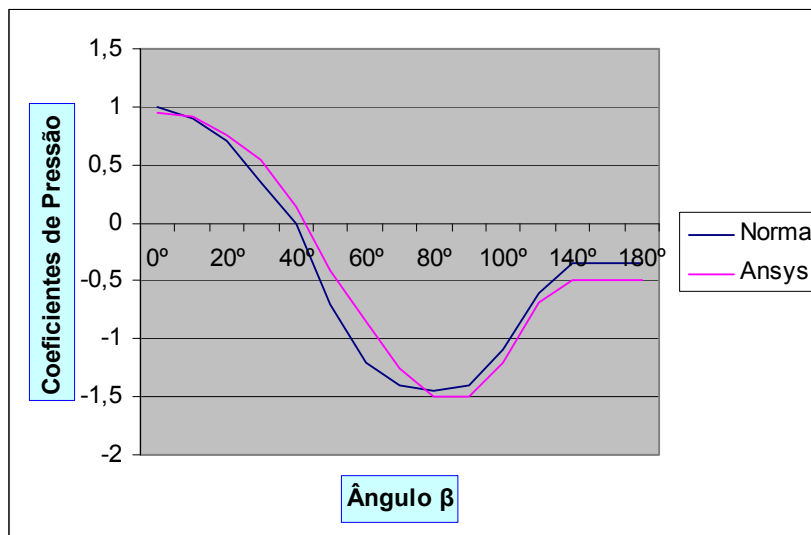


Gráfico 6: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 4.00 metros

Tabela 8 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	928,60
10°	0,90	0,93	882,70	908,90
20°	0,70	0,81	715,90	794,80
30°	0,35	0,54	343,28	530,70
40°	0,00	0,13	0,00	133,07
50°	-0,70	-0,40	-686,60	-337,30
60°	-1,20	-0,84	-1176,90	-800,64
70°	-1,40	-1,30	-1373,10	-1173,10
80°	-1,45	-1,44	-1422,20	-1377,30
90°	-1,40	-1,42	-1373,10	-1366,00
100°	-1,10	-1,20	-1078,90	-1132,00
120°	-0,60	-0,64	-588,48	-605,08
140°	-0,35	-0,52	-343,28	-489,00
160°	-0,35	-0,50	-343,28	-460,44
180°	-0,35	-0,47	-343,28	-440,26

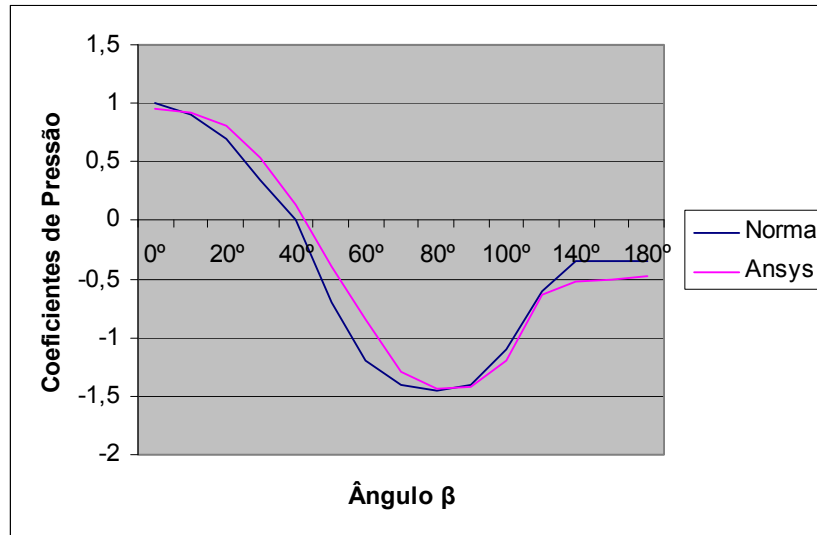


Gráfico 7: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 4.50 metros

Tabela 9 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	928,60
10°	0,90	0,93	882,70	908,90
20°	0,70	0,81	715,90	794,80
30°	0,35	0,54	343,28	532,65
40°	0,00	0,13	0,00	137,56
50°	-0,70	-0,35	-686,60	-328,90
60°	-1,20	-0,82	-1176,90	-779,70
70°	-1,40	-1,20	-1373,10	-1136,10
80°	-1,45	-1,40	-1422,20	-1340,00
90°	-1,40	-1,40	-1373,10	-1319,00
100°	-1,10	-1,14	-1078,90	-1089,00
120°	-0,60	-0,61	-588,48	-578,56
140°	-0,35	-0,51	-343,28	-479,62
160°	-0,35	-0,48	-343,28	-452,90
180°	-0,35	-0,46	-343,28	-494,17

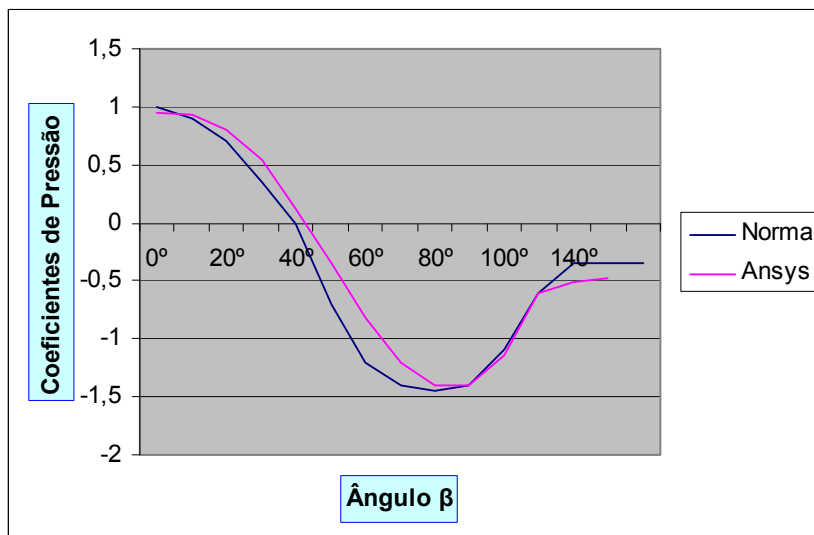


Gráfico 8: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 4.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 5.00 metros

Tabela 10 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,96	980,80	943,90
10°	0,90	0,90	882,70	931,30
20°	0,70	0,80	715,90	770,90
30°	0,35	0,52	343,28	514,95
40°	0,00	0,10	0,00	135,56
50°	-0,70	-0,36	-686,60	-312,40
60°	-1,20	-1,00	-1176,90	-861,30
70°	-1,40	-1,40	-1373,10	-1317,10
80°	-1,45	-1,50	-1422,20	-1425,00
90°	-1,40	-1,50	-1373,10	-1457,30
100°	-1,10	-1,20	-1078,90	-1069,90
120°	-0,60	-0,70	-588,48	-665,70
140°	-0,35	-0,50	-343,28	-522,50
160°	-0,35	-0,50	-343,28	-483,00
180°	-0,35	-0,50	-343,28	-462,40

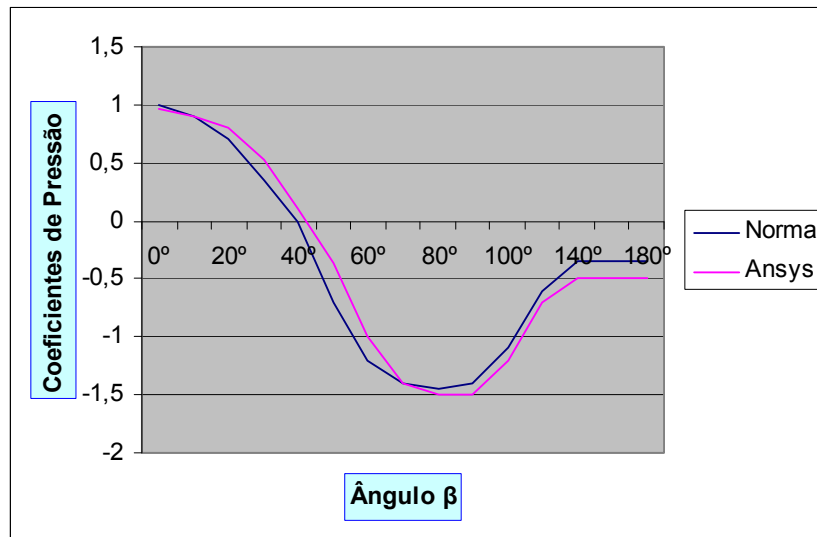


Gráfico 9: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 5.50 metros

Tabela 11 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	933,63
10°	0,90	0,93	882,70	916,65
20°	0,70	0,84	715,90	829,38
30°	0,35	0,60	343,28	594,25
40°	0,00	0,19	0,00	208,66
50°	-0,70	-0,31	-686,60	-278,03
60°	-1,20	-0,83	-1176,90	-782,15
70°	-1,40	-1,25	-1373,10	-1213,40
80°	-1,45	-1,50	-1422,20	-1459,40
90°	-1,40	-1,50	-1373,10	-1515,50
100°	-1,10	-1,30	-1078,90	-1321,60
120°	-0,60	-0,80	-588,48	-759,86
140°	-0,35	-0,53	-343,28	-495,86
160°	-0,35	-0,50	-343,28	-456,69
180°	-0,35	-0,48	-343,28	-433,74

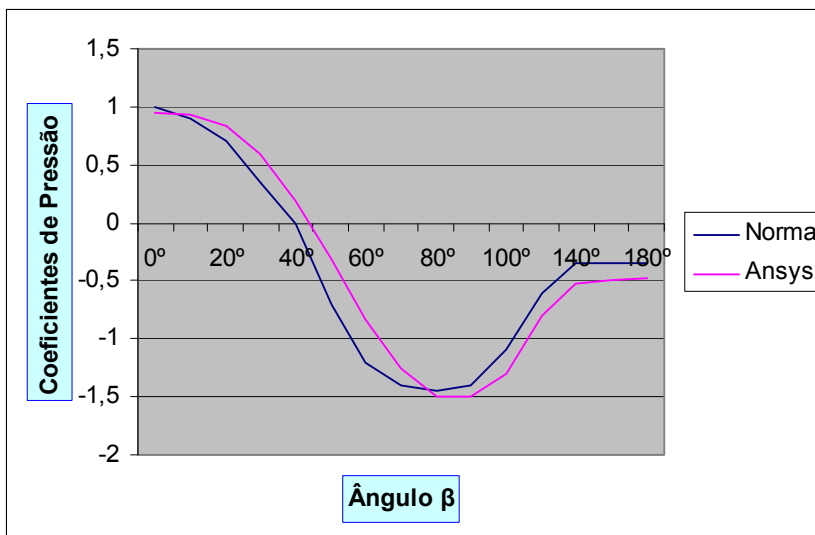


Gráfico 10: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 5.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 6.00 metros

Tabela 12 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,98	980,80	976,40
10°	0,90	0,93	882,70	944,93
20°	0,70	0,82	715,90	820,32
30°	0,35	0,50	343,28	510,18
40°	0,00	0,08	0,00	78,46
50°	-0,70	-0,43	-686,60	-420,60
60°	-1,20	-0,93	-1176,90	-873,80
70°	-1,40	-1,30	-1373,10	-1313,20
80°	-1,45	-1,50	-1422,20	-1421,30
90°	-1,40	-1,50	-1373,10	-1421,30
100°	-1,10	-1,20	-1078,90	-1203,70
120°	-0,60	-0,70	-588,48	-620,90
140°	-0,35	-0,60	-343,28	-536,70
160°	-0,35	-0,55	-343,28	-498,80
180°	-0,35	-0,52	-343,28	-470,66

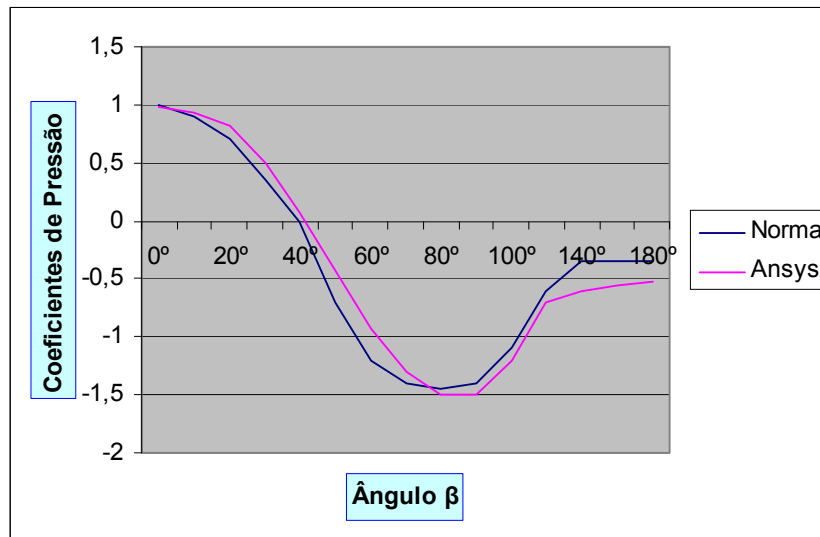


Gráfico 11: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 6.50 metros

Tabela 13 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,97	980,80	950,30
10°	0,90	0,92	882,70	903,20
20°	0,70	0,74	715,90	735,60
30°	0,35	0,38	343,28	389,66
40°	0,00	-0,10	0,00	-96,70
50°	-0,70	-0,72	-686,60	-681,77
60°	-1,20	-1,19	-1176,90	-1134,60
70°	-1,40	-1,50	-1373,10	-1378,90
80°	-1,45	-1,70	-1422,20	-1672,70
90°	-1,40	-1,70	-1373,10	-1618,30
100°	-1,10	-1,30	-1078,90	-1232,80
120°	-0,60	-0,61	-588,48	-571,60
140°	-0,35	-0,46	-343,28	-434,50
160°	-0,35	-0,45	-343,28	-412,39
180°	-0,35	-0,41	-343,28	-478,37

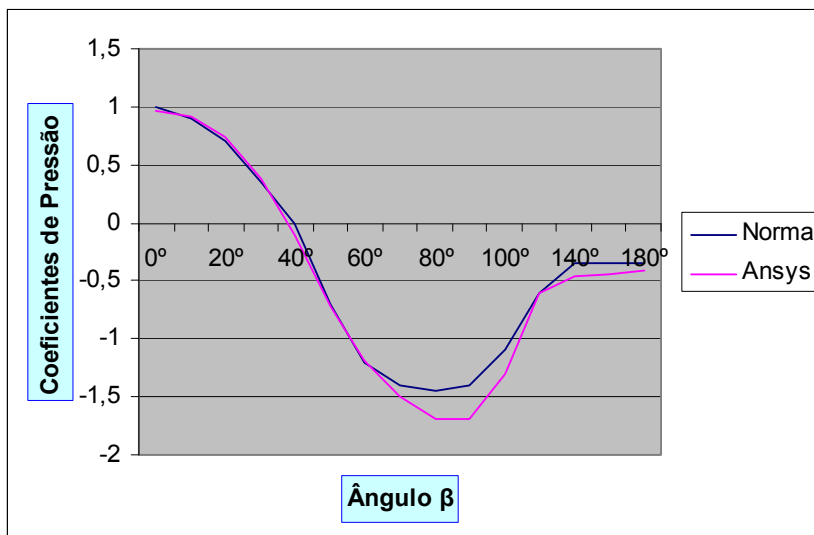


Gráfico 12: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 6.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 7.00 metros

Tabela 14 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	941,78
10°	0,90	0,91	882,70	911,33
20°	0,70	0,74	715,90	737,50
30°	0,35	0,44	343,28	454,20
40°	0,00	0,04	0,00	71,72
50°	-0,70	-0,38	-686,60	-340,60
60°	-1,20	-0,89	-1176,90	-830,40
70°	-1,40	-1,14	-1373,10	-1093,20
80°	-1,45	-1,20	-1422,20	-1132,30
90°	-1,40	-1,10	-1373,10	-987,03
100°	-1,10	-0,75	-1078,90	-703,10
120°	-0,60	-0,30	-588,48	-277,21
140°	-0,35	-0,31	-343,28	-276,50
160°	-0,35	-0,32	-343,28	-290,60
180°	-0,35	-0,30	-343,28	-261,15

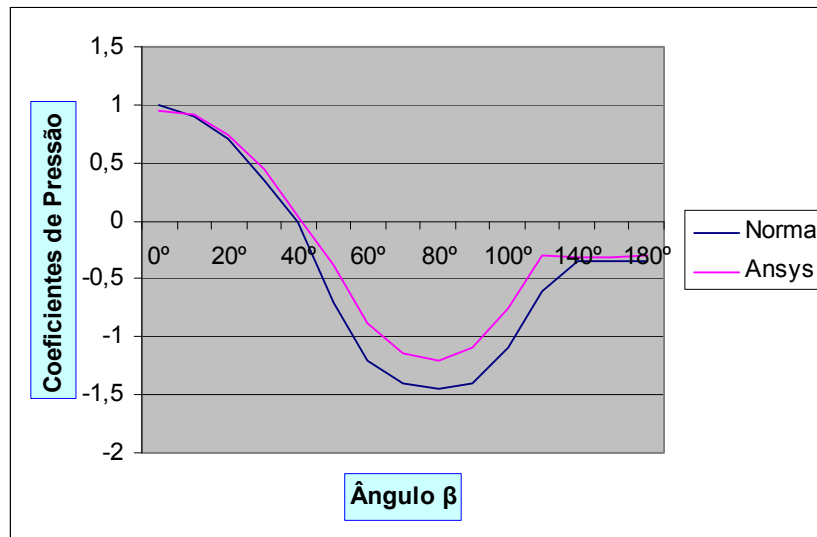


Gráfico 13: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 7.50 metros

Tabela 15 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,94	980,80	949,33
10°	0,90	0,92	882,70	919,79
20°	0,70	0,76	715,90	762,88
30°	0,35	0,44	343,28	448,44
40°	0,00	-0,01	0,00	-18,60
50°	-0,70	-0,50	-686,60	-435,13
60°	-1,20	-0,90	-1176,90	-842,45
70°	-1,40	-1,20	-1373,10	-1094,40
80°	-1,45	-1,25	-1422,20	-1152,00
90°	-1,40	-1,10	-1373,10	-999,00
100°	-1,10	-0,80	-1078,90	-681,97
120°	-0,60	-0,33	-588,48	-288,60
140°	-0,35	-0,33	-343,28	-286,61
160°	-0,35	-0,34	-343,28	-302,09
180°	-0,35	-0,33	-343,28	-291,48

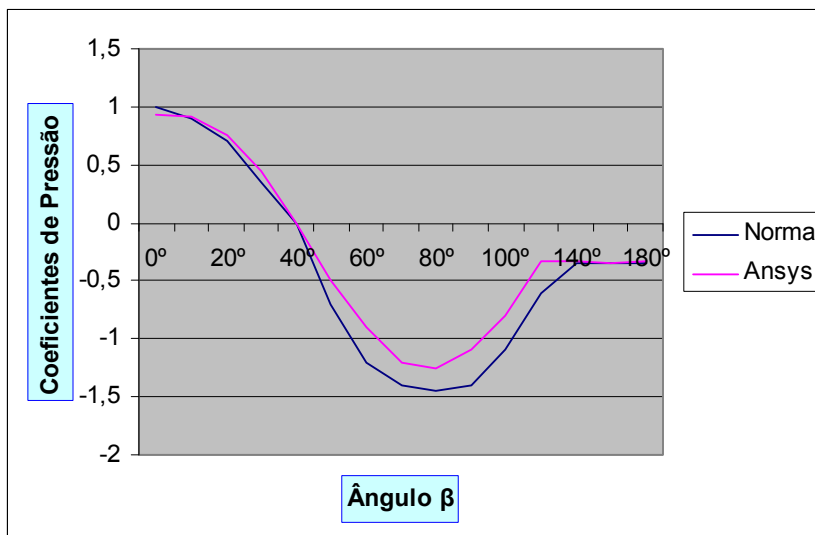


Gráfico 14: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 7.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 8.00 metros

Tabela 16 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,99	980,80	995,65
10°	0,90	0,94	882,70	954,98
20°	0,70	0,78	715,90	789,04
30°	0,35	0,40	343,28	413,96
40°	0,00	-0,15	0,00	-147,12
50°	-0,70	-0,60	-686,60	-632,02
60°	-1,20	-1,23	-1176,90	-1152,20
70°	-1,40	-1,60	-1373,10	-1525,50
80°	-1,45	-1,80	-1422,20	-1679,20
90°	-1,40	-1,70	-1373,10	-1630,40
100°	-1,10	-1,36	-1078,90	-1275,80
120°	-0,60	-0,64	-588,48	-575,50
140°	-0,35	-0,52	-343,28	-467,70
160°	-0,35	-0,48	-343,28	-431,83
180°	-0,35	-0,47	-343,28	-410,40

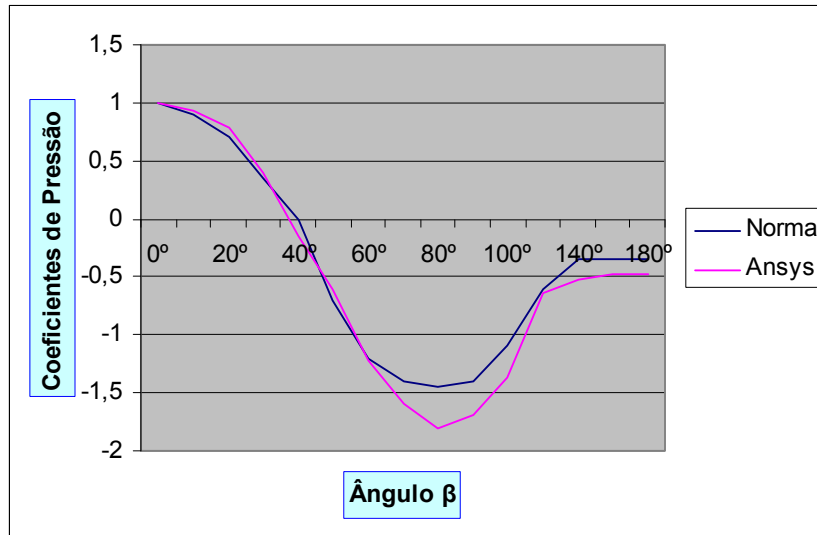


Gráfico 15: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 8.50 metros

Tabela 17 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,96	980,80	958,65
10°	0,90	0,92	882,70	925,41
20°	0,70	0,77	715,90	775,85
30°	0,35	0,44	343,28	464,13
40°	0,00	0,00	0,00	36,70
50°	-0,70	-0,50	-686,60	-414,71
60°	-1,20	-0,90	-1176,90	-817,30
70°	-1,40	-1,15	-1373,10	-1060,20
80°	-1,45	-1,20	-1422,20	-1103,80
90°	-1,40	-1,00	-1373,10	-935,95
100°	-1,10	-0,70	-1078,90	-615,80
120°	-0,60	-0,30	-588,48	-260,04
140°	-0,35	-0,31	-343,28	-257,73
160°	-0,35	-0,31	-343,28	-259,45
180°	-0,35	-0,30	-343,28	-262,90

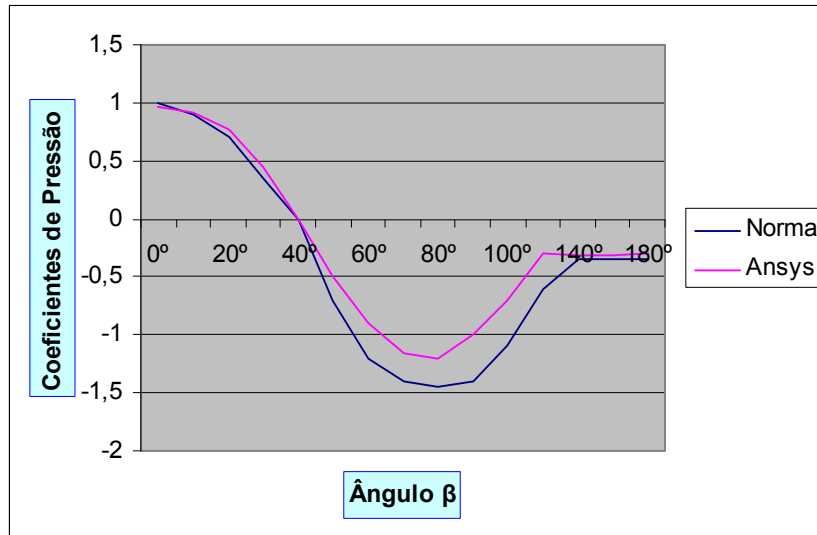


Gráfico 16: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 8.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 9.00 metros

Tabela 18 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,96	980,80	958,65
10°	0,90	0,90	882,70	924,41
20°	0,70	0,77	715,90	775,85
30°	0,35	0,44	343,28	464,13
40°	0,00	0,00	0,00	36,70
50°	-0,70	-0,50	-686,60	-414,71
60°	-1,20	-1,00	-1176,90	-910,33
70°	-1,40	-1,20	-1373,10	-1085,22
80°	-1,45	-1,20	-1422,20	-1103,80
90°	-1,40	-1,00	-1373,10	-935,95
100°	-1,10	-0,70	-1078,90	-615,80
120°	-0,60	-0,30	-588,48	-260,04
140°	-0,35	-0,36	-343,28	-312,73
160°	-0,35	-0,34	-343,28	-279,35
180°	-0,35	-0,33	-343,28	-282,94

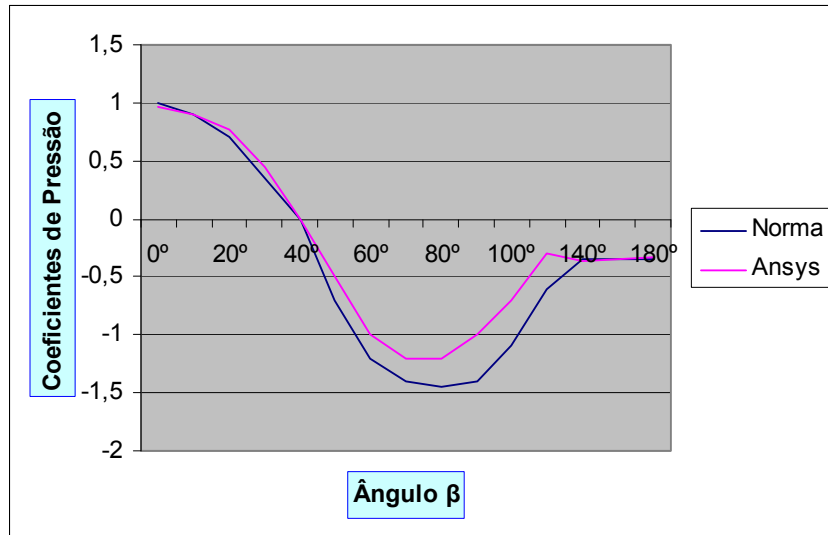


Gráfico 17: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.00 metros

- Torre de diâmetro igual a 9.50 metros

Tabela 19 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.50 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,95	980,80	955,00
10°	0,90	0,92	882,70	927,10
20°	0,70	0,76	715,90	772,17
30°	0,35	0,44	343,28	458,16
40°	0,00	0,00	0,00	32,80
50°	-0,70	-0,50	-686,60	-428,21
60°	-1,20	-0,91	-1176,90	-835,70
70°	-1,40	-1,20	-1373,10	-1086,20
80°	-1,45	-1,22	-1422,20	-1139,60
90°	-1,40	-1,10	-1373,10	-982,32
100°	-1,10	-0,75	-1078,90	-672,30
120°	-0,60	-0,38	-588,48	-319,20
140°	-0,35	-0,36	-343,28	-311,70
160°	-0,35	-0,35	-343,28	-299,30
180°	-0,35	-0,36	-343,28	-314,90

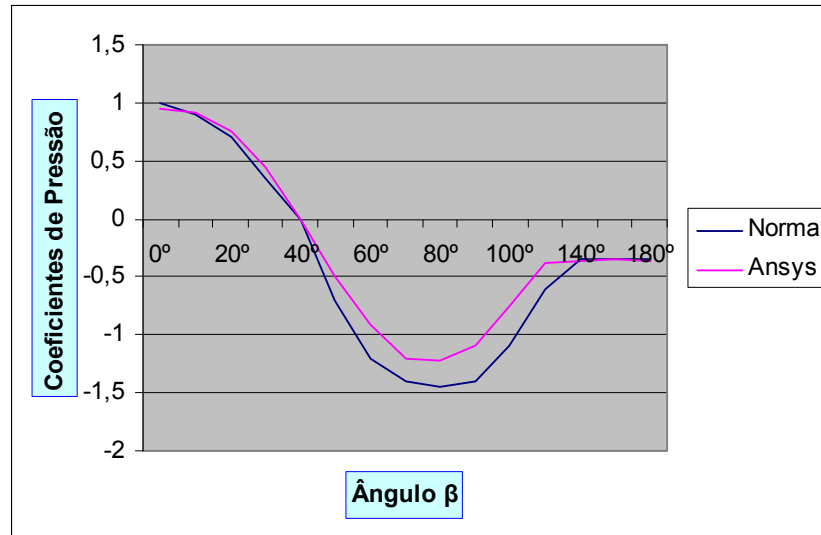


Gráfico 18: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 9.50 metros

- Torre de diâmetro igual a 10.00 metros

Tabela 20 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 10.00 metros

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	1,00	980,80	990,80
10°	0,90	0,92	882,70	920,34
20°	0,70	0,71	715,90	705,29
30°	0,35	0,26	343,28	277,14
40°	0,00	-0,30	0,00	-294,24
50°	-0,70	-0,81	-686,60	-787,73
60°	-1,20	-1,40	-1176,90	-1332,30
70°	-1,40	-1,75	-1373,10	-1733,20
80°	-1,45	-2,00	-1422,20	-1911,90
90°	-1,40	-1,95	-1373,10	-1848,80
100°	-1,10	-1,56	-1078,90	-1476,20
120°	-0,60	-0,60	-588,48	-542,61
140°	-0,35	-0,40	-343,28	-357,40
160°	-0,35	-0,41	-343,28	-370,70
180°	-0,35	-0,32	-343,28	-278,90

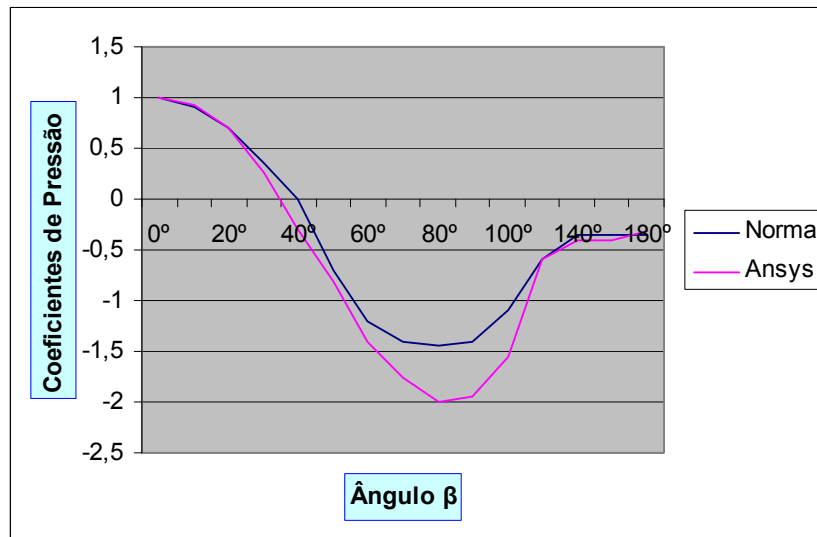


Gráfico 19: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 10.00 metros

7.2. Análise Tridimensional

- Torre de diâmetro igual a 1.00 metros

Tabela 21 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	1,09	980,80	1054,87
10°	0,90	1,15	882,70	1113,82
20°	0,70	1,25	715,90	1230,00
30°	0,35	1,39	343,28	1350,31
40°	0,00	1,41	0,00	1370,03
50°	-0,70	1,06	-686,60	1207,65
60°	-1,20	0,33	-1176,90	310,56
70°	-1,40	0	-1373,10	12,10
80°	-1,45	-0,33	-1422,20	-310,56
90°	-1,40	-0,73	-1373,10	-703,88
100°	-1,10	-0,96	-1078,90	-928,37
120°	-0,60	-1,70	-588,48	-1654,16
140°	-0,35	-1,21	-343,28	-1173,97
160°	-0,35	-0,60	-343,28	-588,48
180°	-0,35	-0,38	-343,28	-360,90

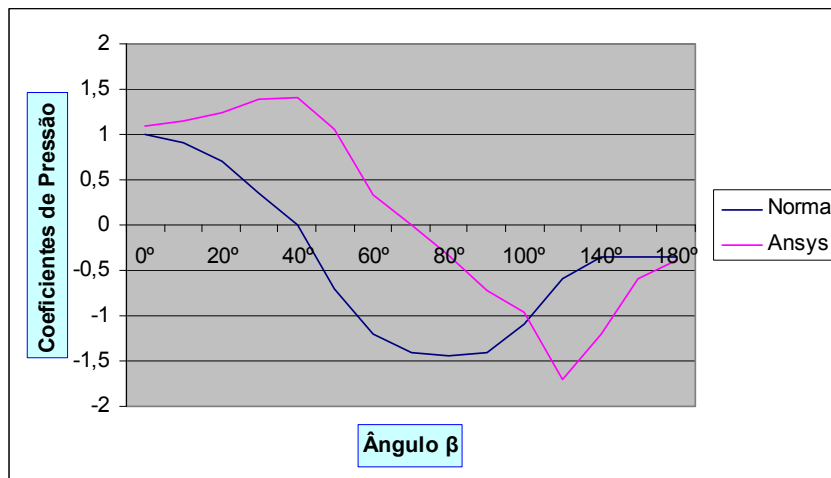


Gráfico 20: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de zero metro altura

Tabela 22 Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 5.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,47	980,80	449,98
10°	0,90	0,52	882,70	498,82
20°	0,70	0,50	715,90	480,40
30°	0,35	0,37	343,28	171,45
40°	0,00	0,25	0,00	243,20
50°	-0,70	0,14	-686,60	135,31
60°	-1,20	0,07	-1176,90	58,66
70°	-1,40	-0,01	-1373,10	9,81
80°	-1,45	-0,08	-1422,20	-68,46
90°	-1,40	-0,14	-1373,10	-135,31
100°	-1,10	-0,18	-1078,90	-176,54
120°	-0,60	-0,34	-588,48	-333,47
140°	-0,35	-0,58	-343,28	-558,86
160°	-0,35	-0,87	-343,28	-853,30
180°	-0,35	-0,64	-343,28	-627,71

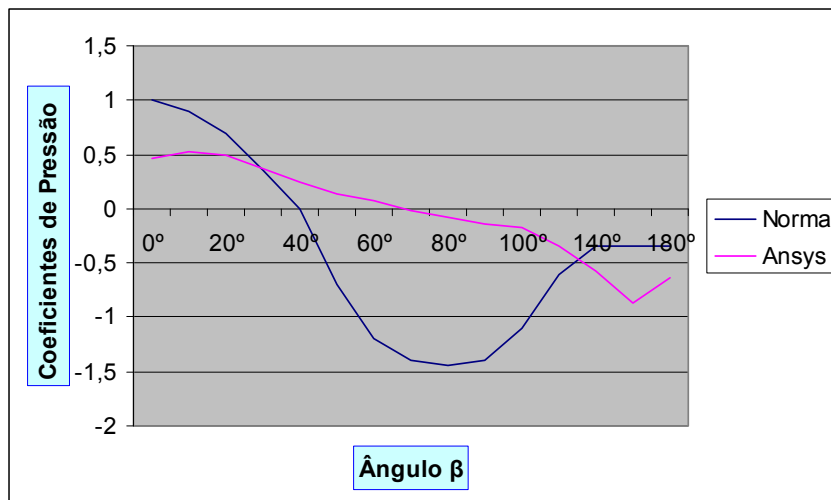


Gráfico 21: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 5.00 metros altura

Tabela 23 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 8.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,77	980,80	745,22
10°	0,90	0,76	882,70	735,41
20°	0,70	0,75	715,90	725,60
30°	0,35	0,60	343,28	578,48
40°	0,00	0,44	0,00	431,55
50°	-0,70	0,28	-686,60	272,62
60°	-1,20	0,15	-1176,90	147,12
70°	-1,40	-0,02	-1373,10	-18,61
80°	-1,45	-0,09	-1422,20	-87,27
90°	-1,40	-0,17	-1373,10	-166,73
100°	-1,10	-0,21	-1078,90	-203,97
120°	-0,60	-0,37	-588,48	-361,90
140°	-0,35	-0,65	-343,28	-637,52
160°	-0,35	-0,86	-343,28	-841,49
180°	-0,35	-0,89	-343,28	-872,91

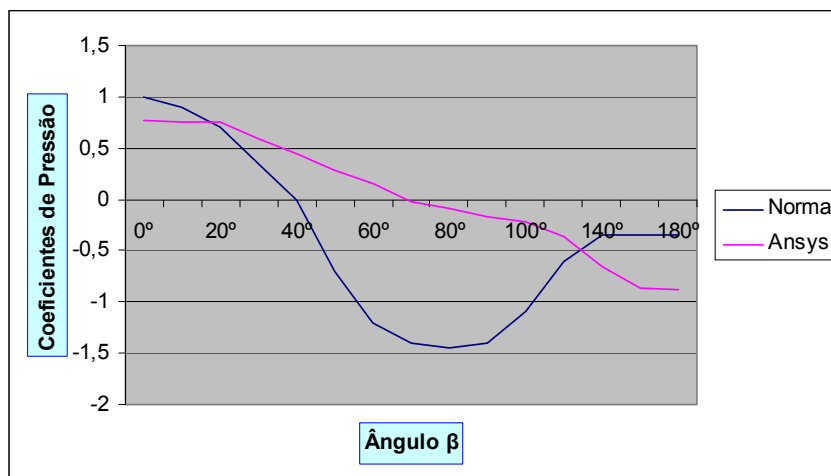


Gráfico 22: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.00 metros a um plano de referência de 8.00 metros altura

- Torre de diâmetro igual a 1.50 metros

Tabela 24 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de zero metro de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	1,01	980,80	980,60
10°	0,90	1,01	882,70	980,60
20°	0,70	1,01	715,90	980,60
30°	0,35	1,02	343,28	989,32
40°	0,00	1,19	0,00	1155,95
50°	-0,70	1,20	-686,60	1165,76
60°	-1,20	1,16	-1176,90	1126,53
70°	-1,40	0,10	-1373,10	98,08
80°	-1,45	-0,50	-1422,20	-479,20
90°	-1,40	-0,87	-1373,10	-842,05
100°	-1,10	-1,10	-1078,90	-1067,62
120°	-0,60	-1,63	-588,48	-1587,47
140°	-0,35	-1,06	-343,28	-1028,41
160°	-0,35	-0,59	-343,28	-566,14
180°	-0,35	-0,44	-343,28	-422,03

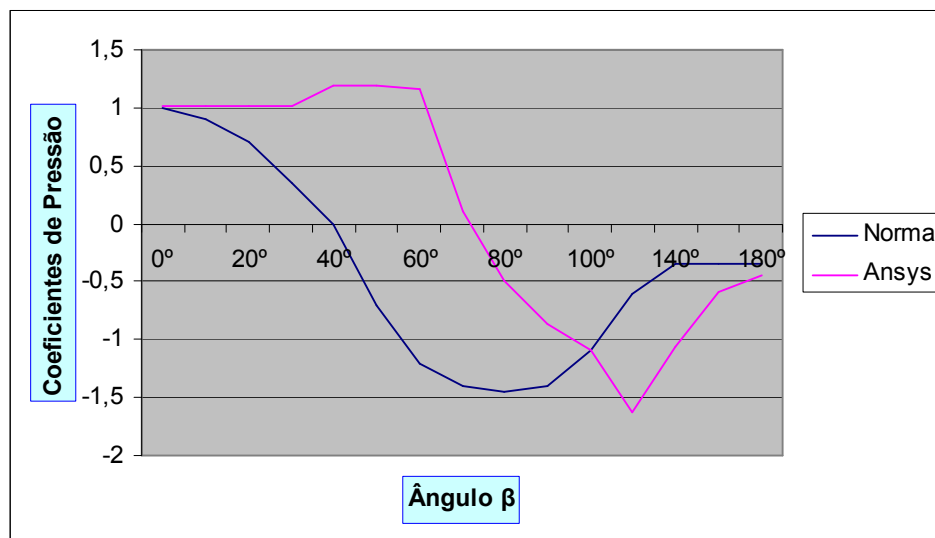


Gráfico 23: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de zero metro altura

Tabela 25 Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 5.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,55	980,80	531,83
10°	0,90	0,42	882,70	411,93
20°	0,70	0,34	715,90	334,20
30°	0,35	0,30	343,28	279,75
40°	0,00	0,23	0,00	225,58
50°	-0,70	0,17	-686,60	166,73
60°	-1,20	0,08	-1176,90	75,16
70°	-1,40	-0,05	-1373,10	-10,10
80°	-1,45	-0,10	-1422,20	-114,83
90°	-1,40	-0,20	-1373,10	-190,09
100°	-1,10	-0,27	-1078,90	-254,73
120°	-0,60	-0,41	-588,48	-399,02
140°	-0,35	-0,50	-343,28	-459,56
160°	-0,35	-0,55	-343,28	-539,44
180°	-0,35	-0,72	-343,28	-697,12

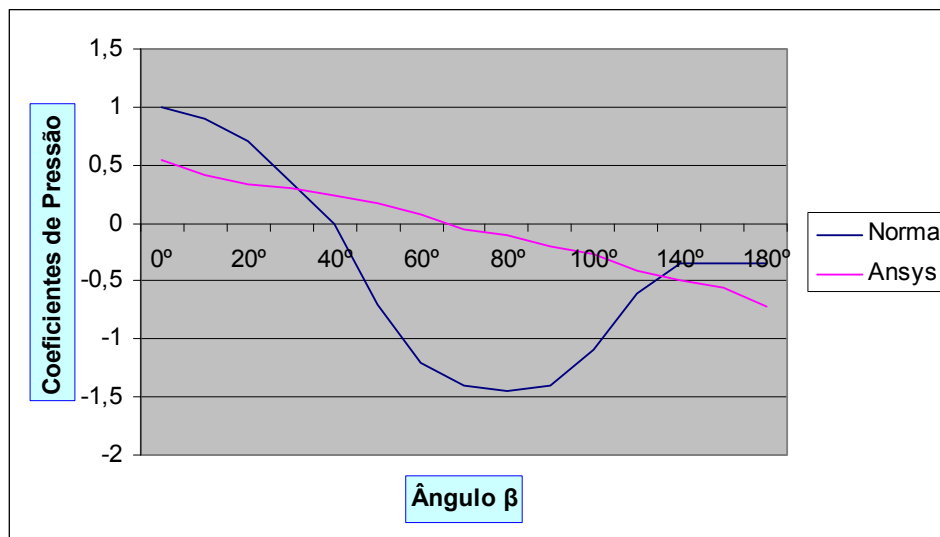


Gráfico 24: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 5.00 metros altura

Tabela 26 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 10.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,68	980,80	659,43
10°	0,90	0,58	882,70	568,86
20°	0,70	0,43	715,90	411,94
30°	0,35	0,28	343,28	256,63
40°	0,00	0,12	0,00	117,70
50°	-0,70	0,06	-686,60	58,84
60°	-1,20	-0,02	-1176,90	-19,43
70°	-1,40	-0,09	-1373,10	-88,27
80°	-1,45	-0,13	-1422,20	-127,50
90°	-1,40	-0,18	-1373,10	-173,13
100°	-1,10	-0,24	-1078,90	-235,39
120°	-0,60	-0,39	-588,48	-376,18
140°	-0,35	-0,48	-343,28	-470,78
160°	-0,35	-0,62	-343,28	-608,09
180°	-0,35	-0,82	-343,28	-791,68

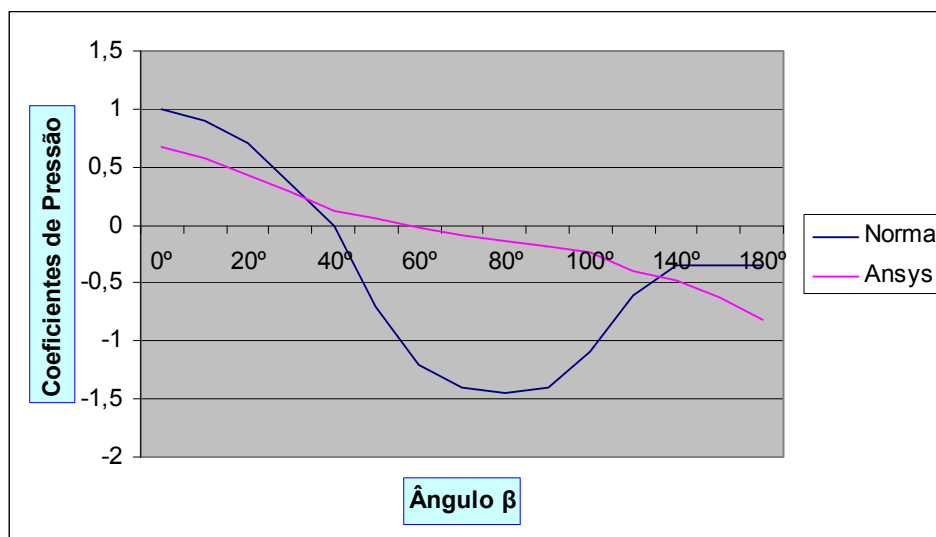


Gráfico 25: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 10.00 metros altura

Tabela 27 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 14.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,90	980,80	874,04
10°	0,90	0,91	882,70	879,39
20°	0,70	0,86	715,90	843,49
30°	0,35	0,75	343,28	727,34
40°	0,00	0,52	0,00	510,02
50°	-0,70	0,22	-686,60	215,78
60°	-1,20	0,05	-1176,90	51,60
70°	-1,40	-0,15	-1373,10	-147,12
80°	-1,45	-0,30	-1422,20	-294,24
90°	-1,40	-0,45	-1373,10	-429,15
100°	-1,10	-0,56	-1078,90	-549,25
120°	-0,60	-0,68	-588,48	-655,68
140°	-0,35	-0,67	-343,28	-654,65
160°	-0,35	-0,47	-343,28	-447,60
180°	-0,35	-0,39	-343,28	-372,98

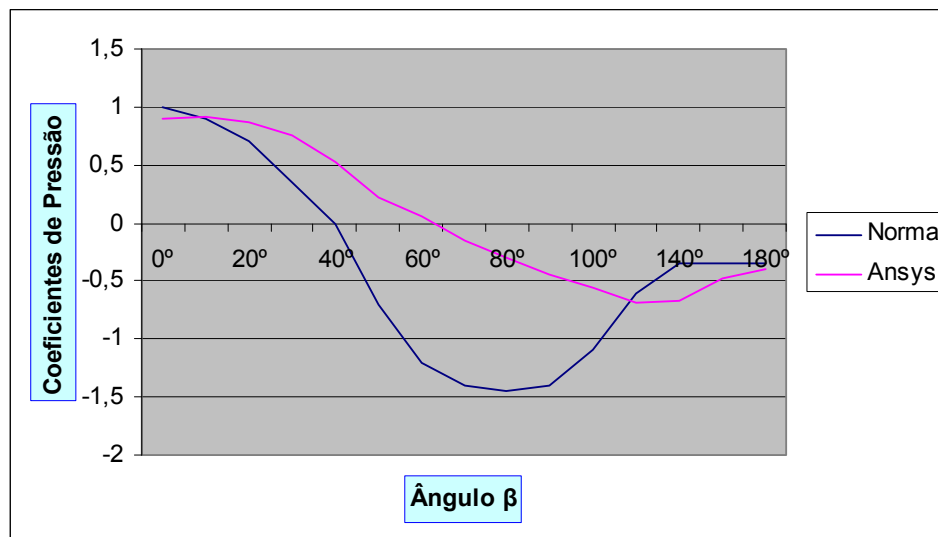


Gráfico 26: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 1.50 metros a um plano de referência de 14.00 metros altura

- Torre de diâmetro igual a 2.00 metros

Tabela 28 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	1,03	980,80	990,86
10°	0,90	1,05	882,70	1018,90
20°	0,70	1,12	715,90	1081,00
30°	0,35	1,26	343,28	1219,40
40°	0,00	1,37	0,00	1331,70
50°	-0,70	1,33	-686,60	1289,46
60°	-1,20	1,26	-1176,90	1127,73
70°	-1,40	0,01	-1373,10	9,80
80°	-1,45	-0,40	-1422,20	-377,32
90°	-1,40	-0,78	-1373,10	-752,72
100°	-1,10	-1,01	-1078,90	-979,31
120°	-0,60	-1,63	-588,48	-1583,70
140°	-0,35	-1,00	-343,28	-968,10
160°	-0,35	-0,58	-343,28	-556,93
180°	-0,35	-0,39	-343,28	-369,11

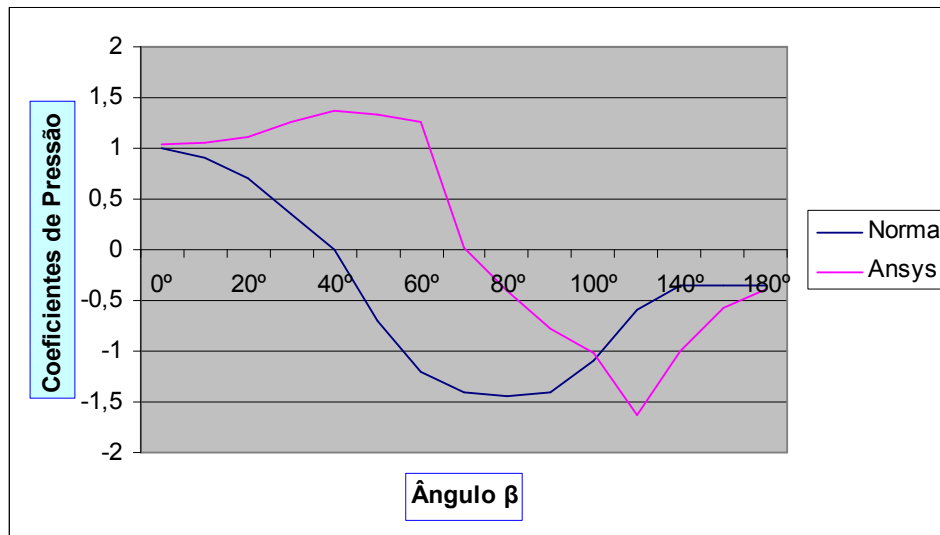


Gráfico 27: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de zero metro altura

Tabela 29 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 5.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,60	980,80	575,68
10°	0,90	0,63	882,70	602,90
20°	0,70	0,57	715,90	546,66
30°	0,35	0,48	343,28	458,98
40°	0,00	0,40	0,00	392,32
50°	-0,70	0,27	-686,60	252,52
60°	-1,20	0,17	-1176,90	151,73
70°	-1,40	0,03	-1373,10	27,42
80°	-1,45	-0,08	-1422,20	-75,46
90°	-1,40	-0,22	-1373,10	-204,90
100°	-1,10	-0,31	-1078,90	-289,04
120°	-0,60	-0,51	-588,48	-487,40
140°	-0,35	-0,73	-343,28	-700,98
160°	-0,35	-0,72	-343,28	-693,87
180°	-0,35	-0,71	-343,28	-684,07

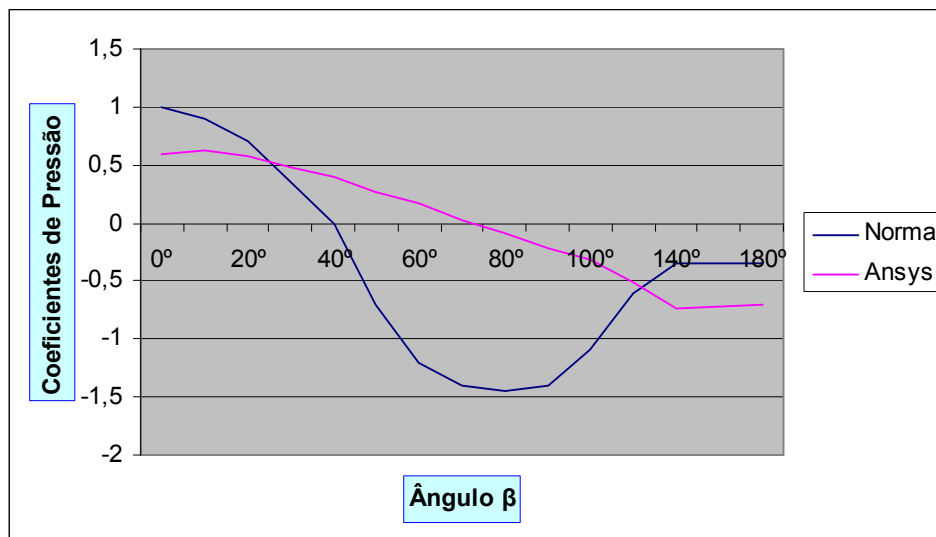


Gráfico 28: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 5.00 metros altura

Tabela 30 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 10.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,52	980,80	499,85
10°	0,90	0,57	882,70	544,86
20°	0,70	0,52	715,90	498,22
30°	0,35	0,41	343,28	388,62
40°	0,00	0,27	0,00	260,82
50°	-0,70	0,13	-686,60	118,50
60°	-1,20	0,007	-1176,90	6,86
70°	-1,40	-0,09	-1373,10	-78,27
80°	-1,45	-0,17	-1422,20	-157,84
90°	-1,40	-0,25	-1373,10	-232,40
100°	-1,10	-0,27	-1078,90	-255,04
120°	-0,60	-0,39	-588,48	-370,72
140°	-0,35	-0,57	-343,28	-546,49
160°	-0,35	-0,82	-343,28	-789,48
180°	-0,35	-0,63	-343,28	-604,11

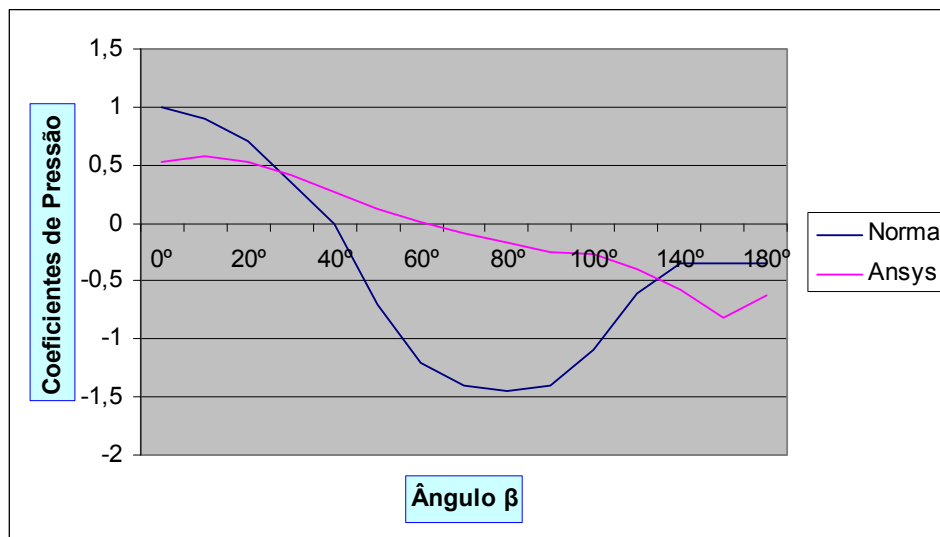


Gráfico 29: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 10.00 metros altura

Tabela 31 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 15.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,83	980,80	801,60
10°	0,90	0,80	882,70	772,28
20°	0,70	0,78	715,90	755,87
30°	0,35	0,67	343,28	644,59
40°	0,00	0,52	0,00	498,60
50°	-0,70	0,40	-686,60	381,32
60°	-1,20	0,22	-1176,90	203,24
70°	-1,40	0,07	-1373,10	65,66
80°	-1,45	-0,07	-1422,20	-65,64
90°	-1,40	-0,21	-1373,10	-193,62
100°	-1,10	-0,28	-1078,90	-261,06
120°	-0,60	-0,45	-588,48	-431,90
140°	-0,35	-0,64	-343,28	-615,23
160°	-0,35	-0,83	-343,28	-801,52
180°	-0,35	-0,80	-343,28	-772,23

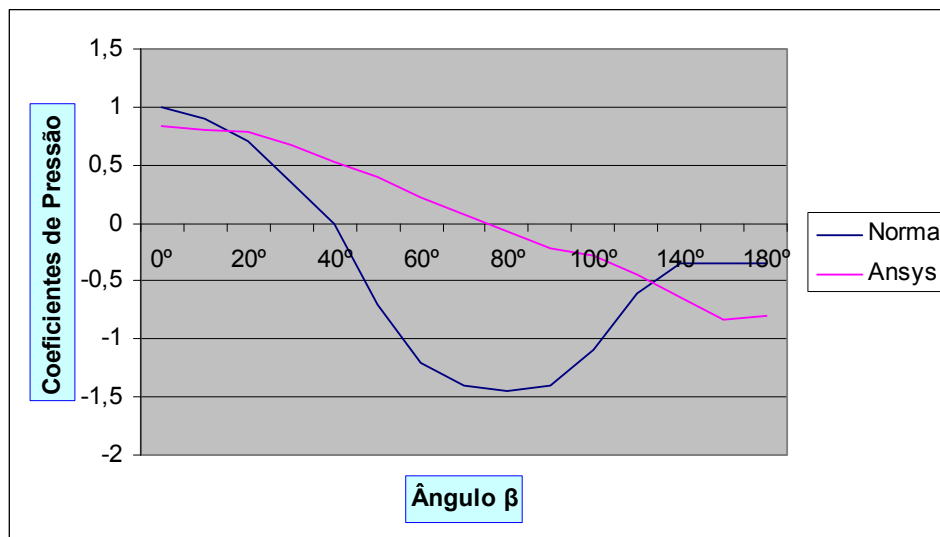


Gráfico 30: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 15.00 metros altura

Tabela 32 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 19.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,90	980,80	869,47
10°	0,90	0,90	882,70	868,94
20°	0,70	0,82	715,90	791,72
30°	0,35	0,72	343,28	692,64
40°	0,00	0,52	0,00	500,15
50°	-0,70	0,24	-686,60	225,13
60°	-1,20	0,09	-1176,90	87,27
70°	-1,40	-0,08	-1373,10	-75,46
80°	-1,45	-0,24	-1422,20	-226,41
90°	-1,40	-0,42	-1373,10	-403,94
100°	-1,10	-0,54	-1078,90	-514,63
120°	-0,60	-0,79	-588,48	-764,58
140°	-0,35	-0,72	-343,28	-696,99
160°	-0,35	-0,55	-343,28	-527,86
180°	-0,35	-0,45	-343,28	-431,10

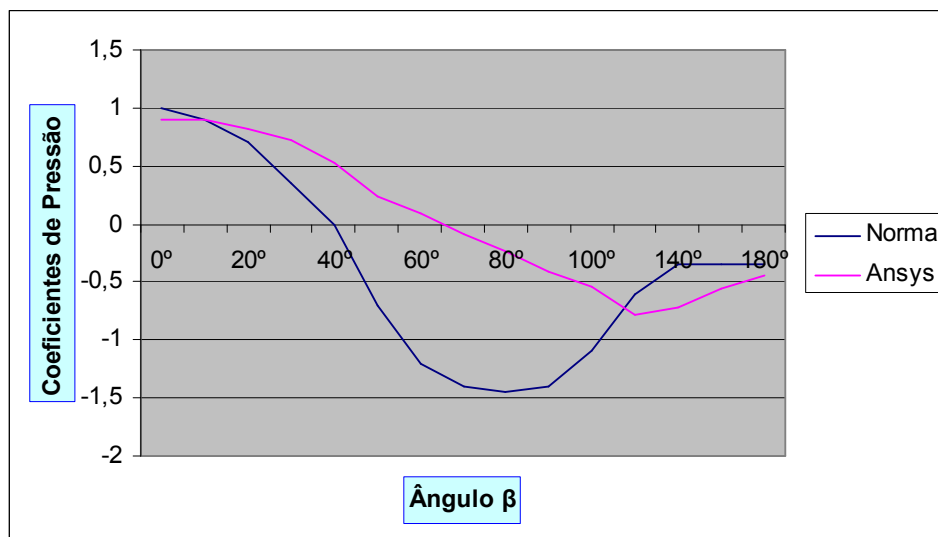


Gráfico 31: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.00 metros a um plano de referência de 19.00 metros altura

- Torre de diâmetro igual a 2.50 metros

Tabela 33 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de zero metro de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	1,01	980,80	976,32
10°	0,90	1,02	882,70	986,48
20°	0,70	1,04	715,90	1007,50
30°	0,35	1,07	343,28	1034,20
40°	0,00	1,06	0,00	1026,30
50°	-0,70	1,10	-686,60	1062,40
60°	-1,20	1,29	-1176,90	1250,65
70°	-1,40	0,03	-1373,10	28,56
80°	-1,45	-0,49	-1422,20	-468,79
90°	-1,40	-0,85	-1373,10	-823,81
100°	-1,10	-1,14	-1078,90	-1102,31
120°	-0,60	-1,70	-588,48	-1653,12
140°	-0,35	-1,06	-343,28	-1027,11
160°	-0,35	-0,59	-343,28	-566,11
180°	-0,35	-0,38	-343,28	-359,16

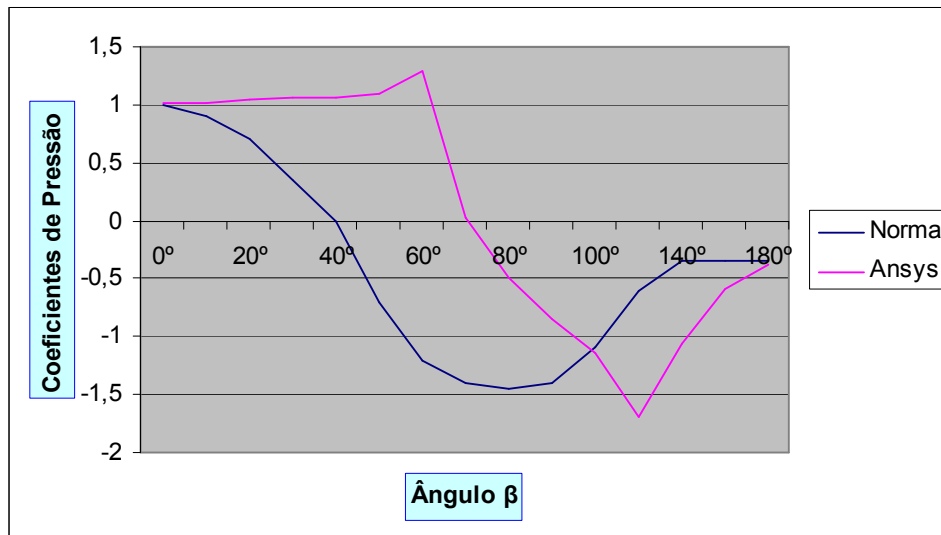


Gráfico 32: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de zero metro altura

Tabela 34 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 5.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,74	980,80	714,79
10°	0,90	0,70	882,70	675,56
20°	0,70	0,69	715,90	665,75
30°	0,35	0,61	343,28	584,72
40°	0,00	0,39	0,00	370,94
50°	-0,70	0,21	-686,60	191,39
60°	-1,20	0,03	-1176,90	26,14
70°	-1,40	-0,09	-1373,10	-78,27
80°	-1,45	-0,22	-1422,20	-204,78
90°	-1,40	-0,32	-1373,10	-302,86
100°	-1,10	-0,34	-1078,90	-329,14
120°	-0,60	-0,45	-588,48	-438,50
140°	-0,35	-0,60	-343,28	-576,34
160°	-0,35	-0,81	-343,28	-783,45
180°	-0,35	-0,85	-343,28	-823,68

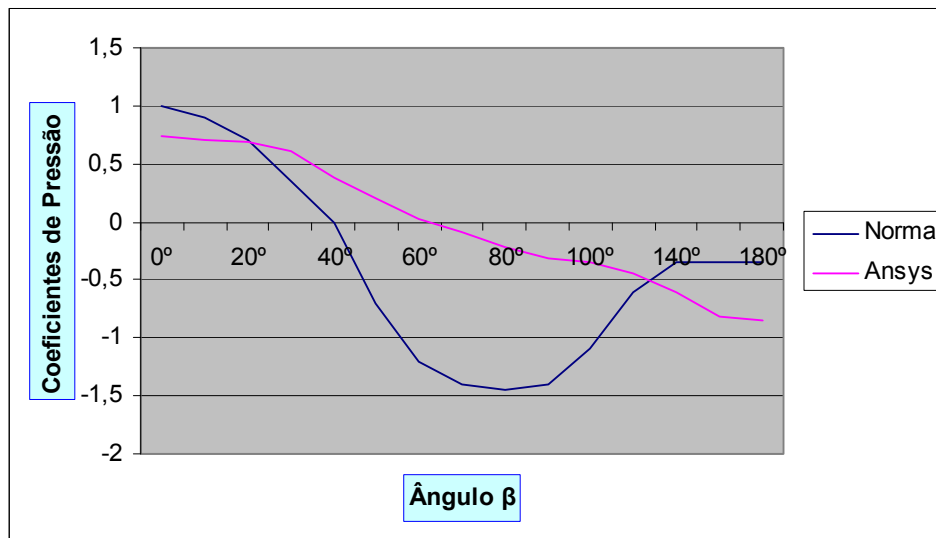


Gráfico 33: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 5.00 metros altura

Tabela 35 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 10.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,31	980,80	292,25
10°	0,90	0,25	882,70	236,08
20°	0,70	0,20	715,90	182,68
30°	0,35	0,14	343,28	128,16
40°	0,00	0,10	0,00	88,55
50°	-0,70	0,08	-686,60	69,90
60°	-1,20	0,05	-1176,90	39,47
70°	-1,40	-0,04	-1373,10	-35,23
80°	-1,45	-0,07	-1422,20	-60,12
90°	-1,40	-0,09	-1373,10	-75,63
100°	-1,10	-0,13	-1078,90	-118,38
120°	-0,60	-0,25	-588,48	-235,00
140°	-0,35	-0,38	-343,28	-361,45
160°	-0,35	-0,54	-343,28	-517,28
180°	-0,35	-0,70	-343,28	-674,00

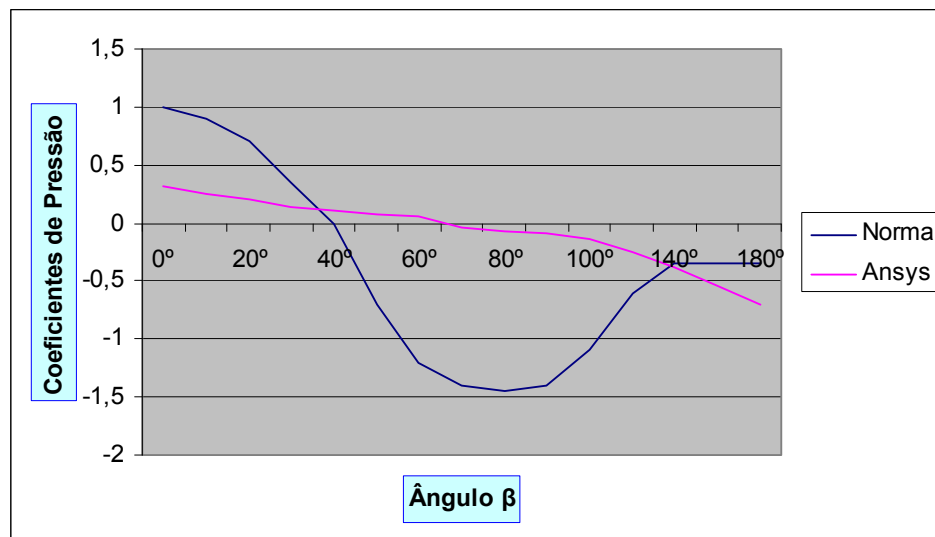


Gráfico 34: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 10.00 metros altura

Tabela 36 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 15.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,60	980,80	576,13
10°	0,90	0,61	882,70	584,72
20°	0,70	0,45	715,90	430,13
30°	0,35	0,28	343,28	260,04
40°	0,00	0,12	0,00	100,70
50°	-0,70	0,09	-686,60	75,92
60°	-1,20	0,05	-1176,90	34,26
70°	-1,40	-0,11	-1373,10	-97,64
80°	-1,45	-0,14	-1422,20	-124,06
90°	-1,40	-0,19	-1373,10	-171,79
100°	-1,10	-0,23	-1078,90	-211,02
120°	-0,60	-0,34	-588,48	-320,23
140°	-0,35	-0,48	-343,28	-456,22
160°	-0,35	-0,66	-343,28	-634,07
180°	-0,35	-0,71	-343,28	-681,80

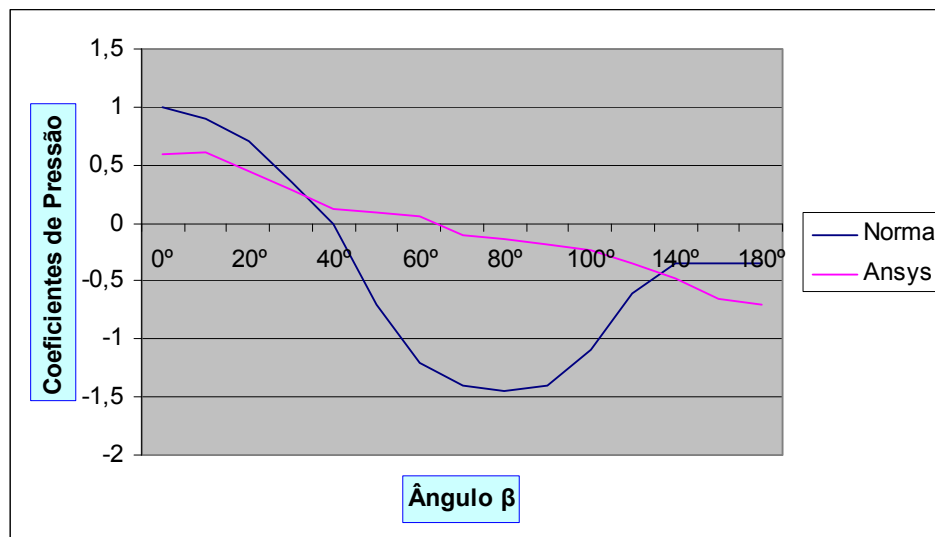


Gráfico 35: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 15.00 metros altura

Tabela 37 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 20.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	1,00	980,80	966,24
10°	0,90	0,92	882,70	888,77
20°	0,70	0,84	715,90	809,31
30°	0,35	0,77	343,28	740,65
40°	0,00	0,53	0,00	507,47
50°	-0,70	0,34	-686,60	318,90
60°	-1,20	0,14	-1176,90	124,96
70°	-1,40	-0,06	-1373,10	-55,85
80°	-1,45	-0,14	-1422,20	-128,19
90°	-1,40	-0,25	-1373,10	-232,84
100°	-1,10	-0,28	-1078,90	-263,37
120°	-0,60	-0,42	-588,48	-398,69
140°	-0,35	-0,63	-343,28	-606,67
160°	-0,35	-0,80	-343,28	-770,07
180°	-0,35	-0,83	-343,28	-801,71

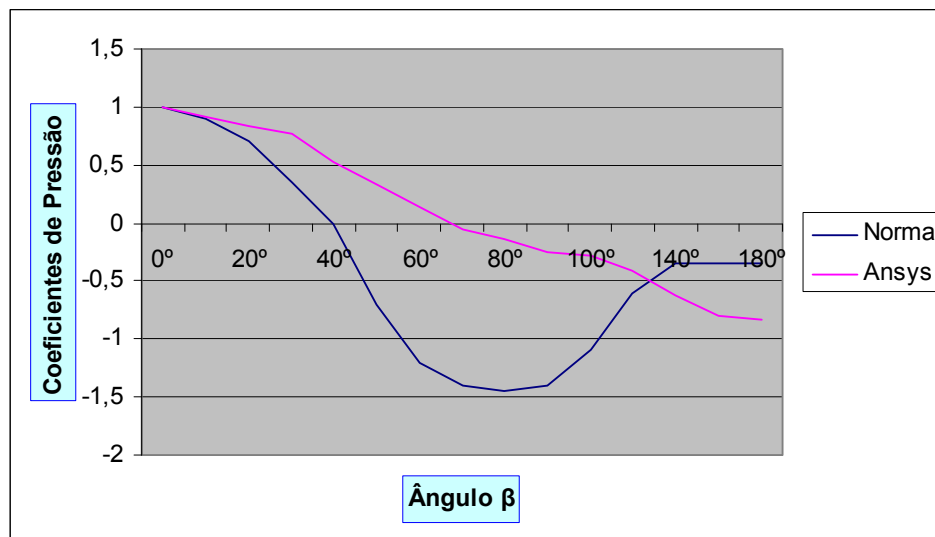


Gráfico 36: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 20.00 metros altura

Tabela 38 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 24.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,91	980,80	877,97
10°	0,90	0,85	882,70	821,32
20°	0,70	0,80	715,90	770,14
30°	0,35	0,72	343,28	691,81
40°	0,00	0,57	0,00	548,70
50°	-0,70	0,30	-686,60	282,79
60°	-1,20	0,18	-1176,90	167,09
70°	-1,40	0,07	-1373,10	67,66
80°	-1,45	-0,08	-1422,20	-76,49
90°	-1,40	-0,18	-1373,10	-167,42
100°	-1,10	-0,39	-1078,90	-373,26
120°	-0,60	-0,73	-588,48	-703,42
140°	-0,35	-0,89	-343,28	-860,39
160°	-0,35	-0,74	-343,28	-713,23
180°	-0,35	-0,68	-343,28	-655,68

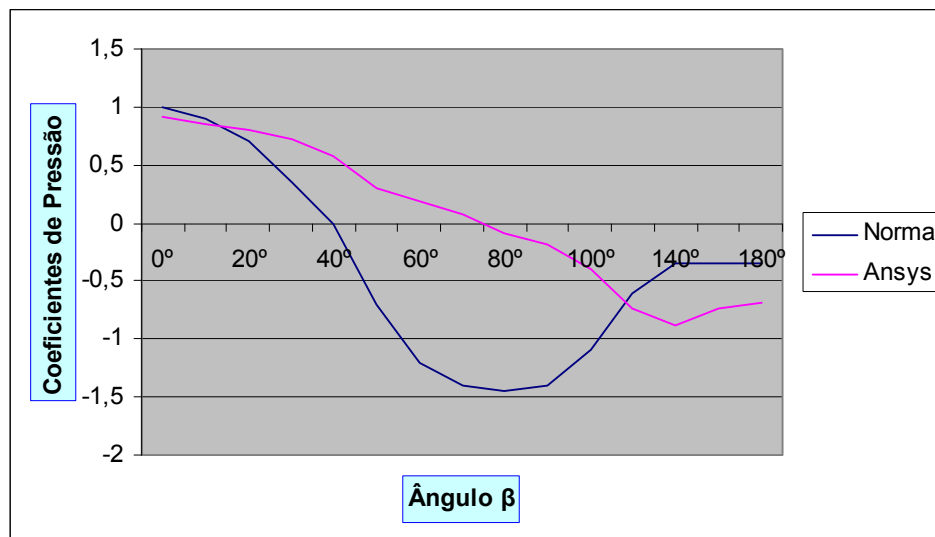


Gráfico 37: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 2.50 metros a um plano de referência de 24.00 metros altura

- Torre diâmetro igual a 3.00 metros

Tabela 39 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de zero metro de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	1,02	980,80	985,12
10°	0,90	1,01	882,70	975,41
20°	0,70	1,01	715,90	975,42
30°	0,35	1,01	343,28	975,42
40°	0,00	1,20	0,00	1161,76
50°	-0,70	1,21	-686,60	1171,17
60°	-1,20	1,30	-1176,90	1258,94
70°	-1,40	0,05	-1373,10	-47,04
80°	-1,45	-0,51	-1422,20	-488,11
90°	-1,40	-0,79	-1373,10	-762,26
100°	-1,10	-1,12	-1078,90	-1086,14
120°	-0,60	-1,66	-588,48	-1614,56
140°	-0,35	-1,04	-343,28	-1006,45
160°	-0,35	-0,57	-343,28	-545,48
180°	-0,35	-0,42	-343,28	-399,40

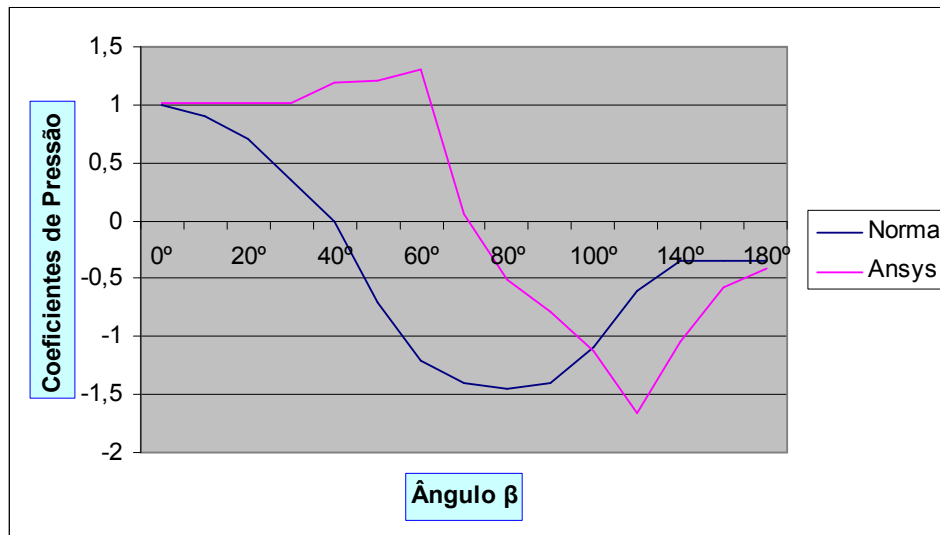


Gráfico 38: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de zero metro altura

Tabela 40 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 5.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,97	980,80	938,88
10°	0,90	0,92	882,70	890,88
20°	0,70	0,89	715,90	860,36
30°	0,35	0,72	343,28	693,08
40°	0,00	0,49	0,00	468,13
50°	-0,70	0,19	-686,60	177,23
60°	-1,20	-0,17	-1176,90	-157,37
70°	-1,40	-0,45	-1373,10	-431,22
80°	-1,45	-0,65	-1422,20	-625,07
90°	-1,40	-0,86	-1373,10	-832,04
100°	-1,10	-0,87	-1078,90	-840,85
120°	-0,60	-0,87	-588,48	-841,84
140°	-0,35	-0,76	-343,28	-734,17
160°	-0,35	-0,58	-343,28	-557,63
180°	-0,35	-0,50	-343,28	-480,40

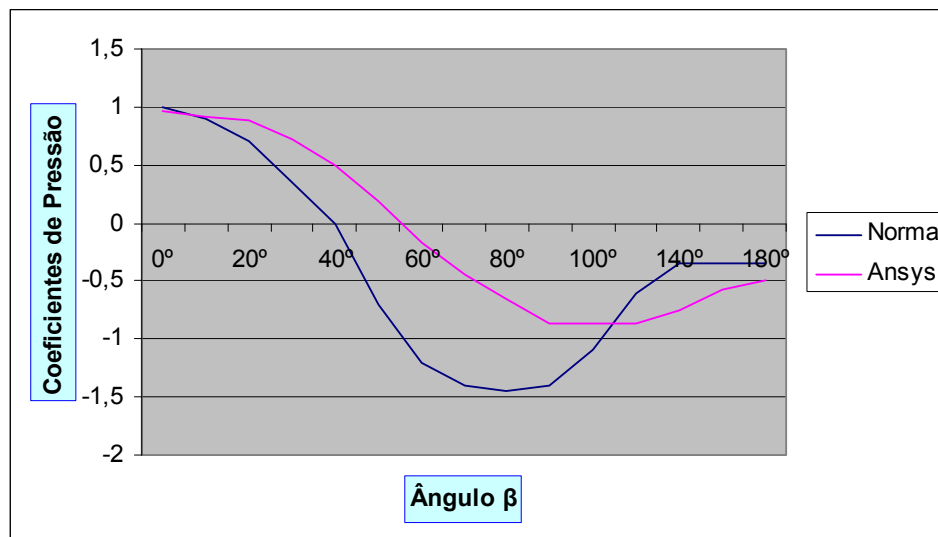


Gráfico 39: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 5.00 metros altura

Tabela 41 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 10.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,72	980,80	696,18
10°	0,90	0,67	882,70	647,14
20°	0,70	0,63	715,90	607,90
30°	0,35	0,52	343,28	500,02
40°	0,00	0,37	0,00	352,90
50°	-0,70	0,24	-686,60	225,39
60°	-1,20	0,17	-1176,90	156,74
70°	-1,40	0,03	-1373,10	29,42
80°	-1,45	-0,04	-1422,20	-39,23
90°	-1,40	-0,10	-1373,10	-97,08
100°	-1,10	-0,15	-1078,90	-137,12
120°	-0,60	-0,30	-588,48	-284,24
140°	-0,35	-0,50	-343,28	-480,40
160°	-0,35	-0,81	-343,28	-784,45
180°	-0,35	-0,90	-343,28	-872,72

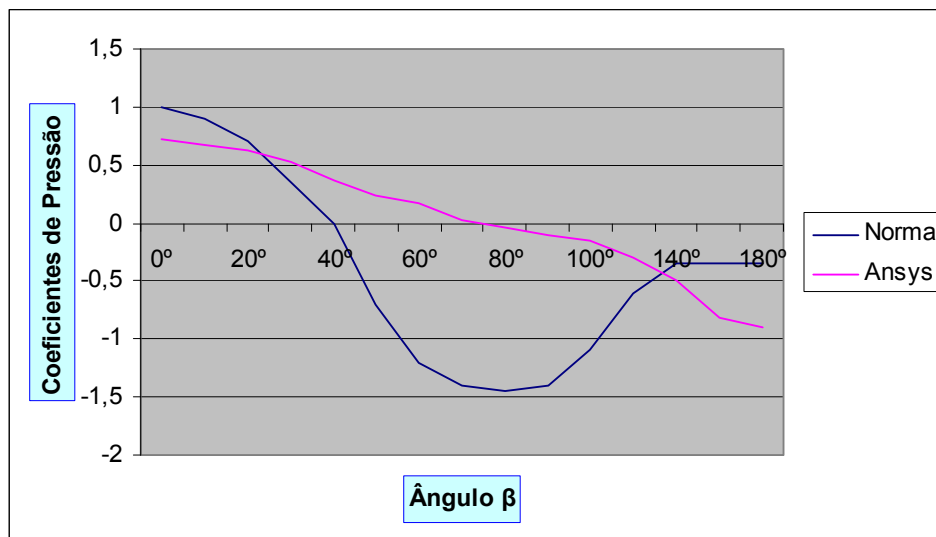


Gráfico 40: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 10.00 metros altura

Tabela 42 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 15.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,60	980,80	578,43
10°	0,90	0,45	882,70	431,36
20°	0,70	0,35	715,90	339,28
30°	0,35	0,28	343,28	267,62
40°	0,00	0,18	0,00	166,54
50°	-0,70	0,13	-686,60	124,50
60°	-1,20	0,06	-1176,90	58,85
70°	-1,40	-0,01	-1373,10	-9,80
80°	-1,45	-0,04	-1422,20	-39,23
90°	-1,40	-0,10	-1373,10	-98,08
100°	-1,10	-0,15	-1078,90	-144,12
120°	-0,60	-0,30	-588,48	-319,66
140°	-0,35	-0,50	-343,28	-479,40
160°	-0,35	-0,73	-343,28	-705,98
180°	-0,35	-0,90	-343,28	-879,72

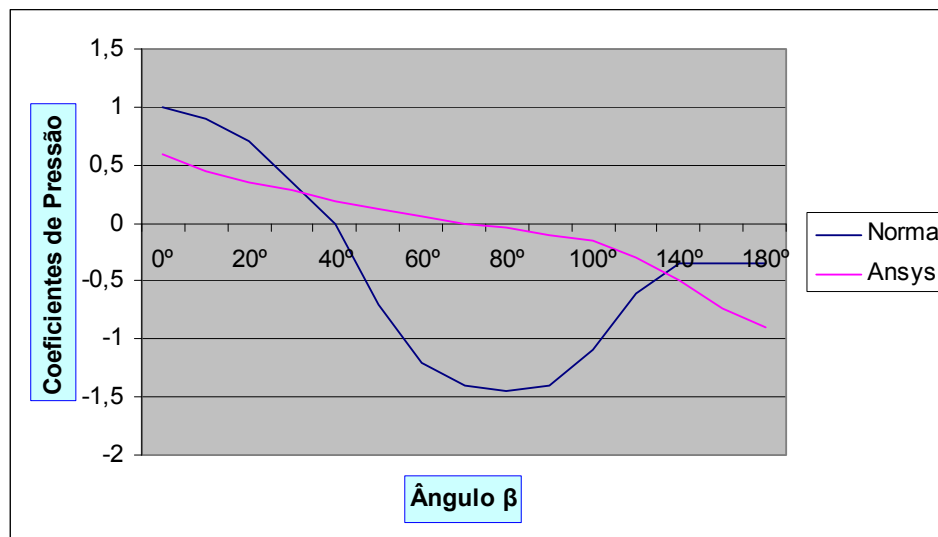


Gráfico 41: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 15.00 metros altura

Tabela 43 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 20.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,86	980,80	835,49
10°	0,90	0,88	882,70	852,10
20°	0,70	0,81	715,90	784,45
30°	0,35	0,66	343,28	637,32
40°	0,00	0,49	0,00	470,59
50°	-0,70	0,38	-686,60	365,70
60°	-1,20	0,19	-1176,90	180,35
70°	-1,40	-0,06	-1373,10	-58,85
80°	-1,45	-0,23	-1422,20	-215,58
90°	-1,40	-0,43	-1373,10	-418,79
100°	-1,10	-0,44	-1078,90	-429,55
120°	-0,60	-0,53	-588,48	-509,82
140°	-0,35	-0,64	-343,28	-619,71
160°	-0,35	-0,71	-343,28	-686,37
180°	-0,35	-0,73	-343,28	-705,98

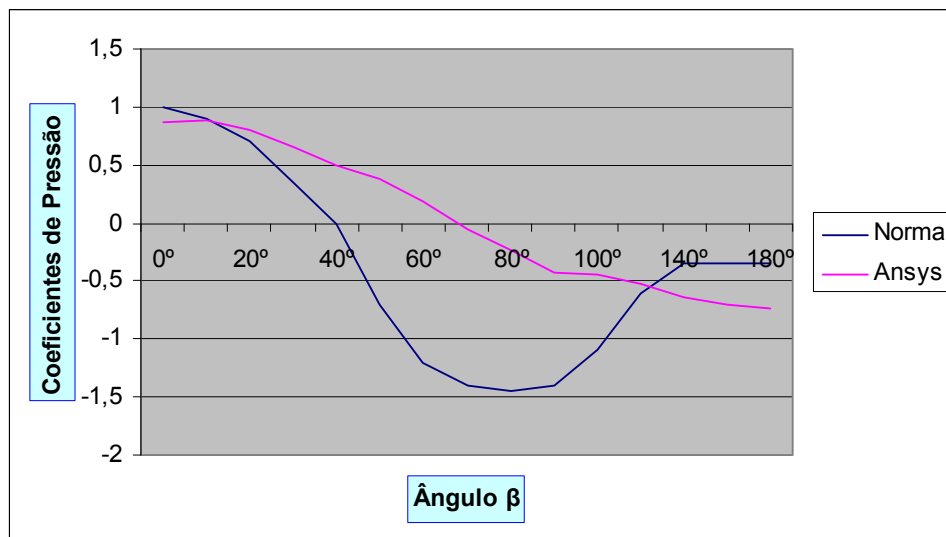


Gráfico 42: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 20.00 metros altura

Tabela 44 – Comparação entre os coeficientes externos de pressão e pressão no perímetro de seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 25.00 metros de altura

β	Superfície lisa - H/d =10			
	Coeficiente de Pressão		Pressão (N/m ²)	
	Norma	ANSYS	Norma	ANSYS
0°	1,00	0,97	980,80	542,38
10°	0,90	0,97	882,70	942,40
20°	0,70	0,85	715,90	823,68
30°	0,35	0,70	343,28	679,56
40°	0,00	0,49	0,00	470,59
50°	-0,70	0,06	-686,60	48,85
60°	-1,20	-0,28	-1176,90	-268,62
70°	-1,40	-0,37	-1373,10	-354,89
80°	-1,45	-0,59	-1422,20	-568,67
90°	-1,40	-0,65	-1373,10	-627,52
100°	-1,10	-0,69	-1078,90	-666,75
120°	-0,60	-0,80	-588,48	-774,69
140°	-0,35	-0,71	-343,28	-684,37
160°	-0,35	-0,45	-343,28	-439,36
180°	-0,35	-0,35	-343,28	-333,28

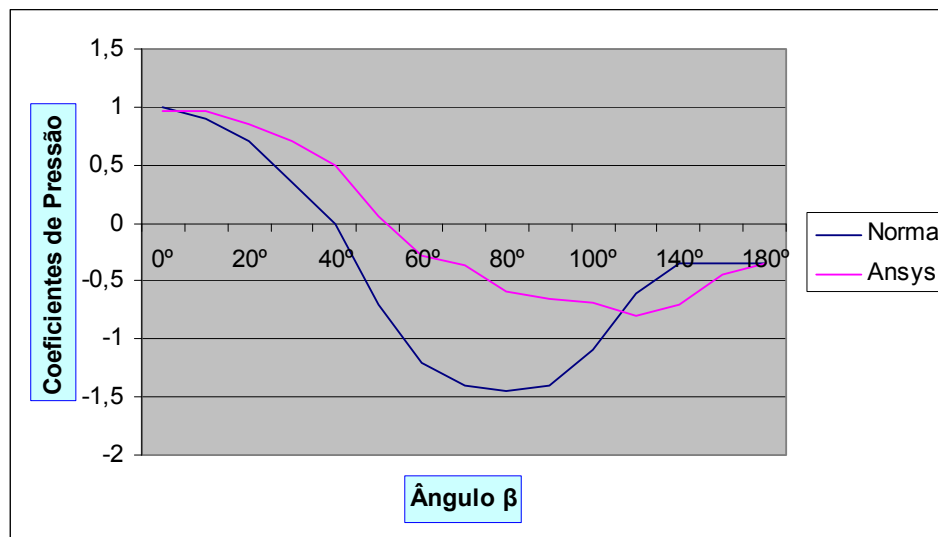


Gráfico 43: Comparação dos coeficientes de pressão no perímetro da seção circular da torre de diâmetro igual a 3.00 metros a um plano de referência de 25.00 metros altura

8. INTERAÇÃO FLUIDO – ESTRUTURA

Neste capítulo será apresentada, de maneira bastante simples e resumida, a interação fluido-estrutura.

Essa interação corresponde aos valores obtidos das pressões devido a ação do vento, aplicadas nas paredes da torres, com a finalidade de avaliar o seu comportamento estrutural segundo essas pressões.

A torre a ser analisada na interação fluido-estrutura terá uma altura de 15.00 metros com diâmetro de 1.50 metros. Será efetuada a análise tridimensional, através da utilização do elemento FLUID142 para obtenção das pressões devido ao vento e posteriormente para avaliar o comportamento estrutural será utilizado o elemento SHELL93.

O fluido onde a torre está inserida possui as mesmas características já mencionadas no item 5.2.3. Já o elemento estrutural utilizado possui as seguintes características: coeficiente de Poisson igual a 0,3 e módulo de elasticidade igual a 20500×10^4 kN/m². A figura 65 mostra a discretização da estrutura bem com a sua condição de contorno.

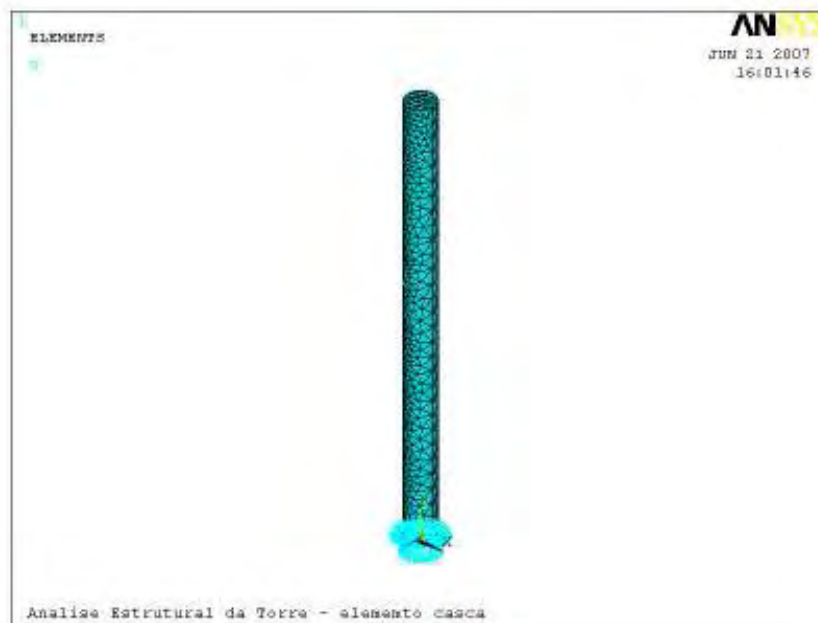


Figura 65 – Discretização e Condição de Contorno da Torre

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

Na análise da solução obtida pelo ANSYS para a interação fluido-estrutura, pode-se verificar o perfil de pressão ao longo da altura da torre, Figura 66, bem como sua deformada devido a essas pressões, Figura 67.

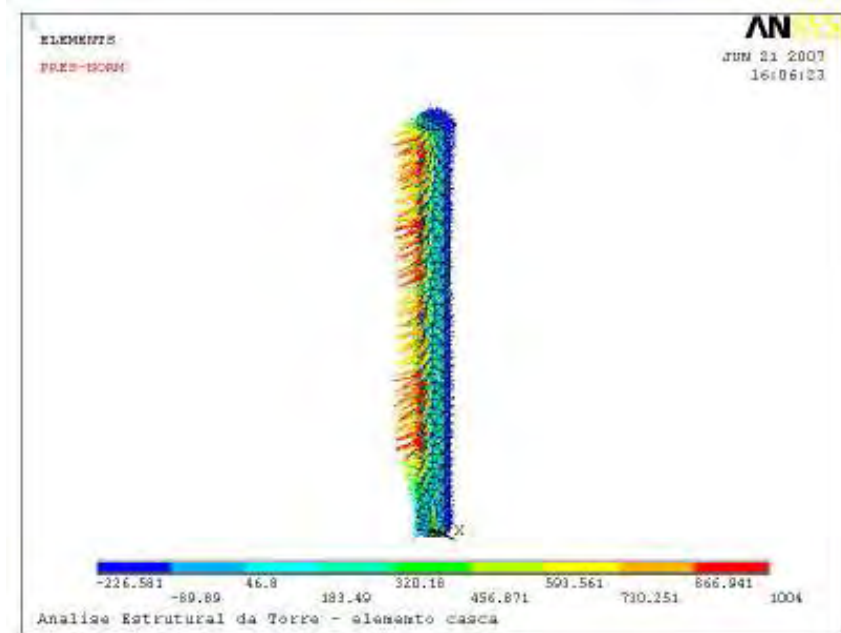


Figura 66 – Pressões Devido a Ação do Vento Aplicada na Torre

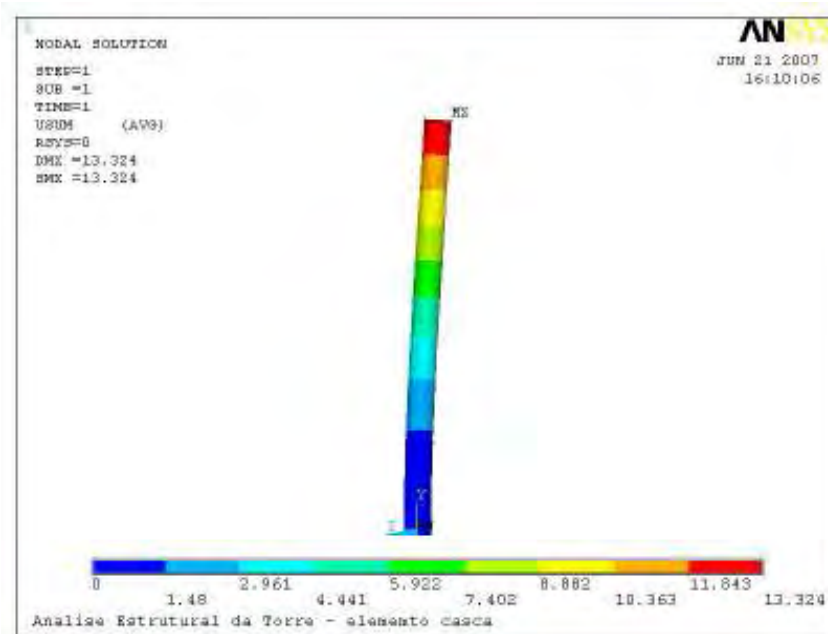


Figura 67 – Deslocamento da Torre

9. CONCLUSÃO

Os coeficientes de pressão obtidos nos ensaios numéricos através da análise bidimensional efetuados pelo programa ANSYS mostraram-se coerentes do ponto de vista aerodinâmico quando comparados com os valores normativos. Na análise bidimensional pode-se observar que os coeficientes de pressão não sofrem variações para valores de diferentes diâmetros.

Já na análise tridimensional os coeficientes aerodinâmicos tanto de sobrepressão quanto de sucção não apresentam a mesma coerência observada na análise bidimensional. Observou-se que na análise tridimensional o ângulo onde os coeficientes de pressão são nulos, seus valores estão compreendidos entre 54° a 76°. Já na análise bidimensional os valores dos ângulos onde os coeficientes de pressão são nulos aproximam-se de 40°, valor este dado por norma.

Na análise tridimensional observou-se também que os coeficientes de pressão sofrem variações ao longo da altura, com valores completamente diferentes dos valores estabelecidos pela norma.

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

Assim, com base nos dados apresentados neste estudo, constata-se a eficiência da simulação numérica através do programa ANSYS para a análise bidimensional, na obtenção dos coeficientes de pressão em seção circular. Com relação à análise tridimensional, observou que os valores prescritos pela norma são bastante conservadores.

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.

11. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: *forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 1988. 110p.

BERTOLINO, JR. R. et al. *Análise e dimensionamento estrutural de torres circulares de aço*. In: JORNADAS SUL AMERICANAS, 29, 2000, Punta Del Este. **Anais...** Punta Del Este: Asociacion Sudamericana de ingenieria estrutural, 2000. 17p. CD ROM.

BLESSMANN, J. *Ação do vento em telhados a quatro águas*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 31., 2000, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Asociacion Sudamericana de ingenieria estrutural, 2004. 19 p. CD ROM.

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, 31, 2000, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Asociacion Sudamericana de ingenieria estrutural, 2004. 13 p. CD ROM.

CARRIL JUNIOR, C. F. **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações**. 2000.143f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GOMES, M. G. et al. **Experimental and numeric study of wind pressures on irregular-plan shapes**. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam*, v. 93, p. 741-756, 2005.

GONÇALVES, R. M. et al. **Ação do vento nas edificações: teorias e exemplos**. São Carlos: Usp, 2004. 122p.

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

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. *Ação do vento sobre o empreendimento SP-Willness*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 31, 2000, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Asociacion sudamericana de ingenieria estrutural, 2004. p14. CD ROM.

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, 31, 2000, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Asociacion sudamericana de ingenieria estrutural, 2004. p14. CD ROM.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. *Ação estática do vento sobre um edifício esbelto de concreto armado*. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 31, 2000, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Asociacion sudamericana de ingenieria estrutural, 2004. p14. CD ROM.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. **Estudo da ação do vento sobre treliçados seccional brasil**: coeficiente de arrasto para módulo de torre. Porto Alegre, Laboratório de Aerodinâmica das Construções, 2003. 24p. (Relatórios)

MANFRIM,S.T. **Estudo numérico para a determinação das pressões devidas á ação do vento em edifícios industriais**. 2006.112f. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

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**, *Amsterdam*, v.61, p. 786 – 807, 2004.

PASQUALINO,P,I. **Colapso de cascas cilíndricas enrijecidas sob pressão hidrostática**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. 7p.(Trabalho de conclusão de curso -Graduação).

SAMPAIO,T,S. **Análise numérica, via MEF, de ligação em treliças metálicas espaciais**. 2004. 263 f.Tese (Menstrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,São Carlos, 2004.

ANEXO A – COEFICIENTES S_1 , S_2 E S_3 PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO OBTIDOS DA NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.5-11)

- 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.

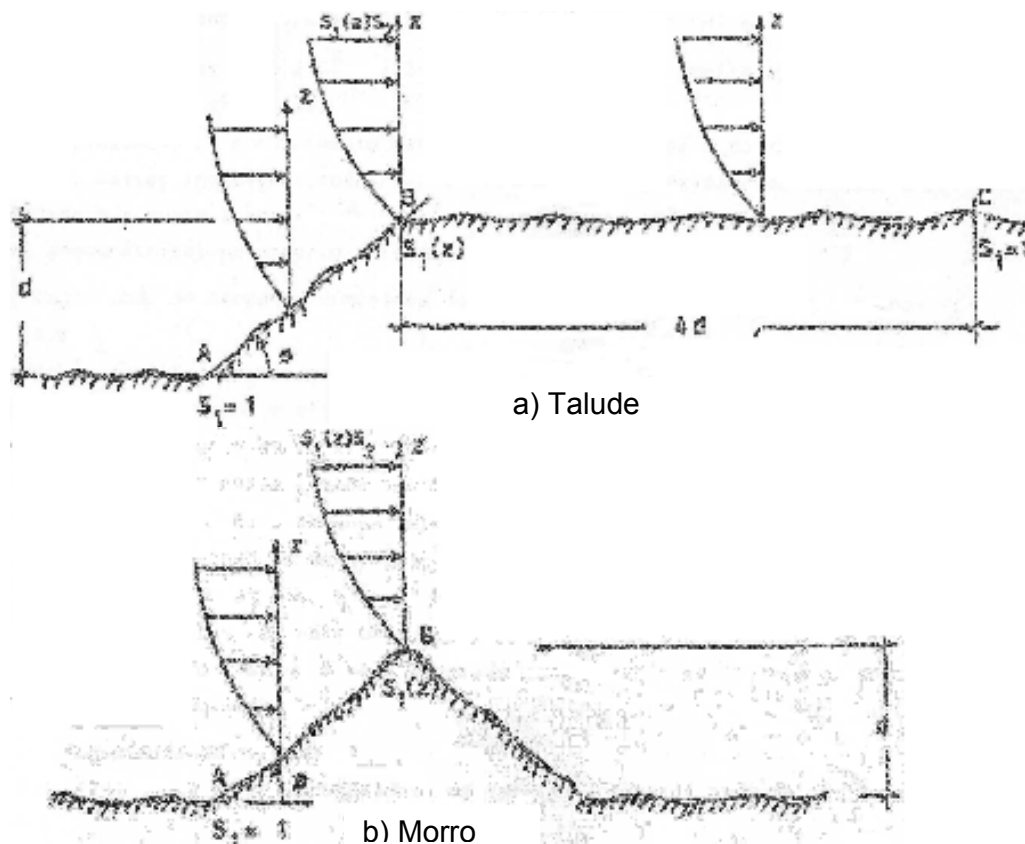


Figura A1 - Fator Topográfico $S_1(Z)$

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 : altura média a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d : diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ : 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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.8), 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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.9) 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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.49-51), 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 : altura acima do nível geral do terreno, limitado a altura gradiente (z_g) que define o contorno superior da camada atmosférica;

Fr : fator de rajada, correspondente à categoria II, classe A;

b : parâmetro meteorológico;

p : 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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.9).

Tabela A1 - Parâmetros Meteorológicos para Definir S_2 . Fonte: NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.9)

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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.10), 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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.10).

Tabela A2 - Fator S_2 . Fonte: NBR 6123 (ABNT..., 1988, p.10)

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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.11).

- 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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.10), indica os valores mínimos do fator S_3 em cinco Grupos.

Tabela A3 - Valores Mínimos do Fator Estatístico S_3 . Fonte: NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.10)

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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.10).

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 :

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

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:

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

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

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

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, Fr,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 S2 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	
III	≤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
	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	
V	≤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
	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 (ASSOCIAÇÃO..., 1988, p.11), quando o comprimento de rugosidade passa de z_{o1} para z_{o2} , 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 ($z_{o1} < z_{o2}$)

As alturas z_x e z_i são determinadas pelas expressões:

$$z_x = Az_{o2} \left(\frac{x}{z_{o2}} \right)^{0,8} \quad (c1)$$

$$z_i = 0,36z_{o2} \left(\frac{x}{z_{o2}} \right)^{0,75} \quad (c2)$$

onde:

$$A = 0,63 - 0,03 \ln \left(\frac{z_{o2}}{z_{o1}} \right) \quad (c3)$$

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_{o1});
da altura z_i para baixo são considerados os fatores S_2 correspondentes ao terreno que circunda a edificação (z_{o2});
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 ($z_{o1} > z_{o2}$)

A altura z_x é determinada pela expressão:

$$z_x = Az_{o2} \left(\frac{x}{z_{o2}} \right)^{0,8} \quad (c4)$$

onde:

$$A = 0,73 - 0,03 \ln \left(\frac{z_{o1}}{z_{o2}} \right) \quad (c5)$$

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_{o1});

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_{o1} 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

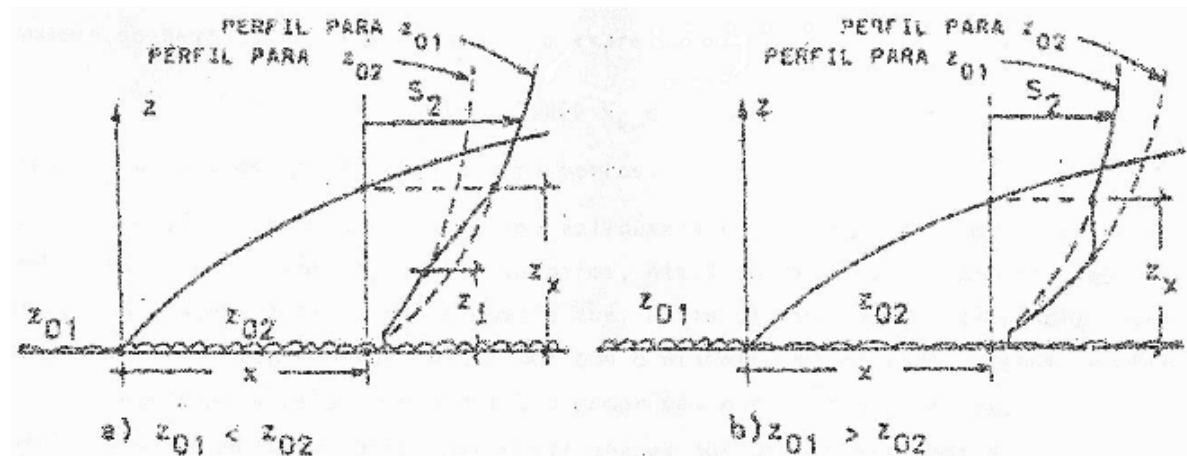


Figura C1 – Perfil de S_2 a sotavento de uma mudança de rugosidade

ANEXO D – FATOR ESTATÍSTICO S_3 PARA A PROBABILIDADE $P_{,m}$ 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.