

# **A AÇÃO DO VENTO EM SILOS CILÍNDRICOS DE BAIXA RELAÇÃO ALTURA/DIÂMETRO**

**Luciano Jorge de Andrade Junior**

Tese apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos, da Universidade de São  
Paulo, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de doutor em  
Engenharia de Estruturas

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlito Calil Junior**

São Carlos  
2002

Aos meus pais,  
fonte de caráter e fundamento incólumes.

Ao professor Carlito Calil Junior, pelas palavras de incentivo e de motivação e pela excelente orientação.

Ao prof. Fernando Martini Catalano, do Laboratório de Aeronaves da Escola de Engenharia de São Carlos, pela orientação nos trabalhos iniciais em túnel de vento e apoio ao doutorado “sandwich” na Universidade de Cranfield.

Ao prof. Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro (in memoriam), do Instituto Luiz Alberto Coimbra de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelos conhecimentos em análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos.

Ao professor Shigeki Katsura, do Shokei Women’s Junior College, Japão, pela visita e discussão dos modelos flexíveis dos silos no período em que estive em Cranfield.

À minha esposa, Nívea Mara, companheira que Deus permitiu-me distinguir durante a composição da Tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo crédito e financiamento ao trabalho.

Aos colegas, funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Estruturas, do Laboratório de Aeronaves e do College of Aeronautics, pelo apoio e préstimos.

# SUMÁRIO

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>i</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>v</i>
<i>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</i>	<i>vii</i>
<i>LISTA DE SÍMBOLOS</i>	<i>viii</i>
<i>RESUMO</i>	<i>xiv</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xv</i>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Considerações</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Definição do problema</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Fundamentos</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Objetivos</b>	<b>10</b>
<b>1.5. Justificativa</b>	<b>11</b>
<b>2. AÇÕES DO VENTO EM SILOS: ESTADO DA ARTE</b>	<b>13</b>
<b>2.1. Área de Mecânica das estruturas</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Área de Engenharia do Vento</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Área de Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos</b>	<b>28</b>
<b>2.4. Comentários sobre a revisão bibliográfica</b>	<b>32</b>
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>34</b>
<b>3.1. Materiais</b>	<b>34</b>
<b>3.2. Métodos</b>	<b>39</b>
3.2.1. Análise Dimensional	39
3.2.1.2. Leis de Semelhança Física	40
3.2.2. Simulação em túnel de vento	48

3.2.3. Medidas de pressões nos modelos rígidos _____	51
3.2.4. Medições de deslocamentos por imagens _____	53
3.2.4.1. Método do Reticulado _____	53
3.2.4.2. Cálculo dos deslocamentos na superfície _____	53
3.2.4.3. Medições de deslocamentos por imagens no modelo flexível _____	59
<b>4. PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS _____</b>	<b>62</b>
<b>4.1. Cálculo e dimensionamento dos protótipos _____</b>	<b>64</b>
<b>4.2. Dimensionamento dos modelos _____</b>	<b>68</b>
4.2.1. Modelos rígidos _____	68
4.2.2. Modelo flexível _____	70
<b>4.3. Geração e caracterização do escoamento no túnel de vento _____</b>	<b>72</b>
<b>4.4. Ensaio aerodinâmico dos modelos rígidos _____</b>	<b>75</b>
<b>4.5. Ensaio estático do modelo flexível _____</b>	<b>76</b>
<b>4.6. Ensaio aeroelástico do modelo flexível _____</b>	<b>78</b>
<b>4.7. Visão geral dos ensaios _____</b>	<b>79</b>
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISE _____</b>	<b>80</b>
<b>5.1. Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência e escalas de turbulência _____</b>	<b>81</b>
<b>5.2. Distribuições de pressões nos modelos rígidos _____</b>	<b>85</b>
5.2.1. Coeficientes de pressão para o modelo 0,5 _____	86
5.2.2. Coeficientes de pressão para o modelo 1,0 _____	92
5.2.3. Coeficientes de arrasto e de sustentação para os modelos rígidos _____	98
5.2.4. Visualizações dos escoamentos de ar junto às superfícies dos modelos rígidos _____	99
5.2.5. Análise dos resultados para os modelos rígidos _____	101
<b>5.3. Descrição do comportamento do modelo flexível _____</b>	<b>110</b>
5.3.1. Configurações de deformação do corpo cilíndrico _____	112
5.3.1.1. Ensaio estático _____	112
5.3.1.2. Ensaio aeroelástico _____	118

5.3.4. Análise da resposta do modelo flexível _____	128
<b>5.4. Interpretação dos resultados para os silos _____</b>	<b>131</b>
5.4.1. Condições de semelhança dos modelos _____	132
5.4.2. Correspondência dos resultados _____	134
5.4.3. Interpretação da resposta do modelo flexível _____	135
<b>5.5. Comentários _____</b>	<b>138</b>
<b>6. CONCLUSÕES _____</b>	<b>141</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE 1 – Cálculos dos Esforços e Dimensionamento do Silo Protótipo 1,0</b>	
<b>APÊNDICE 2 – Cálculos dos Modelos Cilíndricos de Silos</b>	
<b>GLOSSÁRIO</b>	

## LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1 - Perda de estabilidade do costado de silos na Austrália (ANSOURIAN 1985)</i>	2
<i>FIGURA 2- Perda de estabilidade do costado de um silo na Espanha (RAVENET 1992)</i>	2
<i>FIGURA 3 - Distribuições de pressões (NBR6123 1990)</i>	2
<i>FIGURA 4 - Efeito de tombamento (RAVENET 1992)</i>	2
<i>FIGURA 5 - Tipos de separação de escoamento em cilindro (LAWSON 1980)</i>	5
<i>FIGURA 6 - Variação do Coeficiente de arrasto com o número de Reynolds em cilindro (LAWSON 1980)</i>	5
<i>FIGURA 7 – Regimes característicos do fluxo em torno de cilindros (BLESSMANN 1983)</i>	6
<i>FIGURA 8 – Fluxo na zona de descolamento (BLESSMANN 1983)</i>	8
<i>FIGURA 9 - Disposição geral dos dispositivos no túnel</i>	36
<i>FIGURA 10 – Uma regra para a maximização do fator de escala (COOK 1982)</i>	49
<i>FIGURA 11 - Diagrama para as medidas de pressões</i>	52
<i>FIGURA 12 - O deslocamento geral de um elemento linear de PQ para P'Q'</i>	54
<i>FIGURA 13 - O deslocamento de PQ, paralelo ao eixo <math>x_1</math>, para P'Q', inclinado <math>\mathbf{q}</math> em relação ao eixo <math>x_1</math>.</i>	56
<i>FIGURA 14 - A rotação de linhas ortogonais <math>PQ_1</math> e <math>PQ_2</math> de mesmo tamanho</i>	58
<i>FIGURA 15 - Posições <math>V_1, V_2, V_3</math> das câmeras</i>	60
<i>FIGURA 16 - Deslocamentos para a vista de cada câmera</i>	60
<i>FIGURA 17 - Reticulado deformado</i>	61
<i>FIGURA 18 - Vista <math>0V_1</math></i>	61
<i>FIGURA 19 - Vista <math>0V_2</math></i>	61
<i>FIGURA 20 - Vista <math>0V_3</math></i>	61
<i>FIGURA 21 - Geometria das chapas</i>	64
<i>FIGURA 22 - Geometria do silo</i>	64
<i>FIGURA 23 - Fluxograma de cálculo e dimensionamento dos protótipos</i>	65
<i>FIGURA 24 - Perfil das colunas</i>	67
<i>FIGURA 25 - Coluna dupla</i>	67

<i>FIGURA 26 - Modelos com tomadas de pressão e superfície lisa</i>	69
<i>FIGURA 27 - Modelos com tomadas de pressão e elementos externos</i>	70
<i>FIGURA 28 – Modelo flexível</i>	71
<i>FIGURA 29 - Vista frontal dos dispositivos e pontos de aquisição de dados</i>	74
<i>FIGURA 30 - Vista lateral dos dispositivos e pontos de aquisição de dados</i>	74
<i>FIGURA 31 - Modelo flexível 1,0 com reticulado e locais das cargas pontuais</i>	76
<i>FIGURA 32 – Aplicação das forças locais e o transdutor de deslocamentos no modelo flexível</i>	77
<i>FIGURA 33 – Vista <math>V_1</math> do modelo flexível indeformado</i>	77
<i>FIGURA 34 – Vista <math>V_2</math> do modelo flexível indeformado</i>	77
<i>FIGURA 35 – Vista <math>V_3</math> do modelo flexível indeformado</i>	77
<i>FIGURA 36 - Posições para a câmera relativas à seção do túnel</i>	78
<i>FIGURA 37 – Perfis de velocidade normalizada e linha de tendência</i>	81
<i>FIGURA 38 – Perfis da intensidade de turbulência normalizada</i>	83
<i>FIGURA 39 – Escalas temporais de turbulência</i>	84
<i>FIGURA 40 – Escalas espaciais de turbulência</i>	85
<i>FIGURA 41 – Modelo rígido 0,5 com elementos externos</i>	86
<i>FIGURA 42 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 0,5 com superfície lisa; perspectiva</i>	87
<i>FIGURA 43 – <math>C_P</math> para o modelo 0,5 com elementos externos; perspectiva</i>	88
<i>FIGURA 44 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 0,5 com superfície lisa; vista xy da cobertura</i>	89
<i>FIGURA 45 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 0,5 com elementos externos; vista xy da cobertura</i>	89
<i>FIGURA 46 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 0,5 com superfície lisa; vista elevada yz</i>	90
<i>FIGURA 47 - <math>C_{pe}</math> para o modelo 0,5 com elementos externos; vista elevada yz</i>	90
<i>FIGURA 48 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 0,5 com superfície lisa; vista elevada xz</i>	91
<i>FIGURA 49 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 0,5 com elementos externos; vista elevada xz</i>	91
<i>FIGURA 50 – Modelo rígido 1,0 com elementos externos</i>	92
<i>FIGURA 51 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 1,0 com superfície lisa; perspectiva</i>	93
<i>FIGURA 52 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 1,0 com elementos externos; perspectiva</i>	94
<i>FIGURA 53 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 1,0 com superfície lisa; vista xy da cobertura</i>	95
<i>FIGURA 54 – <math>C_{pe}</math> para o modelo 1,0 com elementos externos; vista xy da cobertura</i>	95



FIGURA 55 – $C_{pe}$ para o modelo 1,0 com superfície lisa; vista elevada yz	96
FIGURA 56 – $C_{pe}$ para o modelo 1,0 com elementos externos; vista elevada yz	96
FIGURA 57 – $C_{pe}$ para o modelo 1,0 com superfície lisa; vista elevada xz	97
FIGURA 58 – $C_{pe}$ para o modelo 1,0 com elementos externos; vista elevada xz	97
FIGURA 59 – Vórtices de base	100
FIGURA 60 – $C_{pe}$ no cilindro do modelo 0,5 - tomadas de pressão a $z/H = 0,70$	103
FIGURA 61 – $C_{pe}$ dos modelos 0,5 - tomadas de pressão em $z/H = 1,0$	104
FIGURA 62 - $C_{pe}$ dos modelos 1,0 - tomadas de pressão em $z = 510$ mm	106
FIGURA 63 – Modelo cilíndrico nervurado, $H/D=1,73$ (FLACHSBART 1932)	107
FIGURA 64 - $C_{pe}$ no cilindro do modelo 1,0 - tomadas de pressão a $z/H = 0,47$	108
FIGURA 65 - Área característica em foco 1, vista $V_1$	110
FIGURA 66 - Área característica em foco 1, vista $V_2$	111
FIGURA 67 - Área característica em foco 1, vista $V_3$	111
FIGURA 68 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N - $z = 255$ mm, $V_1$	113
FIGURA 69 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N - $z = 380$ mm, $V_1$	113
FIGURA 70 – Cilindro indeformado e com força 1,37 N - $z = 255$ mm, $V_2$	114
FIGURA 71 – Cilindro indeformado e com força 1,37 N - $z = 380$ mm, $V_2$	114
FIGURA 72 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N - $z = 255$ mm, $V_3$	115
FIGURA 73 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N - $z = 380$ mm, $V_3$	115
FIGURA 74 – Imagens do modelo em indeformado(à esq.) e com força de 1,37 N	116
FIGURA 75 – Ondulação em tempo alternado na coluna 1 e nas colunas 3 e 4; 6,9m/s, vista 1, foco 3	120
FIGURA 76 – Configurações de deformação a barlavento; 6,9m/s, vista 1, foco 3	121
FIGURA 77 – Modelo flexível sob o vento a 6,9 m/s, vista 1	121
FIGURA 78 – Início de movimentação da coluna 4 a $35^\circ$ ; 5,6 m/s, vista 2, foco 2	122
FIGURA 79 – Tempo de duração das deflexões na coluna 4; velocidade 5,6 m/s	122
FIGURA 80 – Intervalo entre as deflexões na coluna 4; velocidade 5,6 m/s	123
FIGURA 81 - Tempo de duração das deflexões na coluna 1; velocidade 6,9 m/s	124
FIGURA 82 - Intervalo entre as deflexões na coluna 1; velocidade 6,9 m/s	124
FIGURA 83 – Ondulação da casca que envolve as colunas 1; vista 2	125
FIGURA 84 - Ondulação da casca que envolve as colunas 1 e outra que envolve a coluna 4	125

<i>FIGURA 85 - Ondulação da casca sobre as colunas 1 e outra sobre a coluna 3</i>	<i>126</i>
<i>FIGURA 86 - A coluna 4, a 35°, sofre deflexão; 5,6 m/s, vista 3, foco 2</i>	<i>126</i>
<i>FIGURA 87 - Deflexões das colunas 3 e 4 e das colunas 1; 6,9 m/s, vista 3, foco 2</i>	<i>127</i>
<hr/>	
<i>FIGURA 88 - Percentual de duração das deflexões da coluna 4; 5,6 m/s</i>	<i>128</i>
<i>FIGURA 89 - Percentual dos intervalos das deflexões da coluna 4; 5,6 m/s</i>	<i>129</i>
<i>FIGURA 90 - Percentual de duração das deflexões da coluna 1; 6,9 m/s</i>	<i>130</i>
<i>FIGURA 91 - Percentual dos intervalos das deflexões da coluna 1; 6,9 m/s</i>	<i>130</i>
<i>FIGURA 92 - Situação de perda de estabilidade de um cilindro de alumínio para uma pressão crítica do vento. RESINGER &amp; GREINER (1981)</i>	<i>136</i>
<i>FIGURA 93 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para <math>H/D = 0,5</math> e superfície cônica lisa com inclinação 27°</i>	<i>143</i>
<i>FIGURA 94 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para <math>H/D = 0,5</math> e superfície cônica com saliências e inclinação 27°</i>	<i>144</i>
<i>FIGURA 95 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para <math>H/D = 1,0</math> e superfície cônica lisa com inclinação 27°</i>	<i>144</i>
<i>FIGURA 96 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para <math>H/D = 1,0</math> e superfície cônica com saliências e inclinação 27°</i>	<i>144</i>
<i>FIGURA 97 - Posições <math>z/H</math> dos anéis no silo <math>H/D = 0,5</math></i>	<i>146</i>
<i>FIGURA 98 - Posições <math>z/H</math> dos anéis no silo <math>H/D = 1,0</math></i>	<i>146</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 1 - Fatores influentes na estabilidade de cascas enrijecidas</i>	9
<i>TABELA 2 - Descrição dos dispositivos</i>	36
<i>TABELA 3 - Especificações para o material usado no Modelo 1,0</i>	38
<i>TABELA 4 – Variáveis Independentes</i>	41
<i>TABELA 5 – Funções de forma</i>	41
<i>TABELA 6 – Fatores de forma</i>	42
<i>TABELA 7 - Números <b>P</b></i>	44
<i>TABELA 8 - Fatores de escala</i>	45
<i>TABELA 9 - Condições de semelhança</i>	45
<i>TABELA 10 - Dimensões dos protótipos</i>	65
<i>TABELA 11 – Espessuras calculadas das chapas e colunas - protótipo <math>H/D=0,5</math></i>	66
<i>TABELA 12 - Espessuras calculadas das chapas e colunas - protótipo <math>H/D=1,0</math></i>	66
<i>TABELA 13 – Pesos e massas dos protótipos</i>	67
<i>TABELA 14 - Dimensões dos modelos em função dos diâmetros dos protótipos</i>	68
<i>TABELA 15 - Dimensões das colunas e dos fios para os modelos</i>	69
<i>TABELA 16 – Largura variável das colunas do modelo flexível</i>	71
<i>TABELA 17 – Resumo das características dos ensaios</i>	79
<i>TABELA 18 – Comparação entre as velocidades de ensaio e as das normas</i>	82
<i>TABELA 19 - Comparação entre os <math>I</math> de ensaio e os <math>I</math> das normas</i>	83
<i>TABELA 20 – Coeficientes de arrasto e de sustentação dos modelos</i>	98
<i>TABELA 21 – Valores dos <math>C_{pe}</math> no cilindro nervurado (FLACHSBART 1932)</i>	107
<i>TABELA 22 – Valores médios dos deslocamentos radiais dos ensaios estáticos medidos com o transdutor</i>	112
<i>TABELA 23 – Valores obtidos por imagens dos deslocamentos radiais dos ensaios estáticos</i>	117
<i>TABELA 24 – Resumo dos trechos de vídeo dos ensaios aeroelásticos</i>	119
<i>TABELA 25 – Deslocamentos radiais típicos da casca cilíndrica na região <math>255 &lt; z &lt; 300</math> mm, <math>-4,5^\circ &lt; \mathbf{q} &lt; +4,5^\circ</math>, velocidade 6,9 m/s</i>	127
<i>TABELA 26 – Magnitudes dos fatores de escala</i>	134

*TABELA 27 – Distribuição das pressões externas para os silos cilíndricos de relação  $H/D = 0,5$  e  $1,0$  \_\_\_\_\_ 142*

*TABELA 28 – Valores dos coeficientes de arrasto para silos cilíndricos com relação  $H/D = 0,5$  e  $1,0$  \_\_\_\_\_ 143*

*TABELA 29 - Valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação para as coberturas cônicas de inclinação  $27^\circ$  ( $b/D=1/4$ ) com relação  $H/D = 0,5$  e  $1,0$ \_\_\_\_ 145*

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCE	American Society of Civil Engineers
BLWT	Boundary Layer Wind Tunnel (Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica)
BS	British Standard (Norma Britânica)
CLA	Camada Limite Atmosférica
CSA	Camada superficial atmosférica (Atmospheric Surface Layer)
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
ATC	Anemômetro de temperatura constante (Constant temperature anemometer)
DIN	Deutsche Industrie Normen (Normas Industriais Alemãs)
ESDU	Engineering Science Data Unit (Banco de Dados da Ciência da Engenharia)
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções
LAE	Laboratório de Aeronaves (Escola de Engenharia de São Carlos – USP)
NBR	Norma Brasileira Registrada
SI	Sistema Internacional de Unidades
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UWO	University of Western Ontario
VCD	Video Compact Disc (formato de vídeo digital)

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos maiúsculos

A	Área (geral); área bruta da seção transversal da barra
$A_f$	Área da estrutura projetada no plano perpendicular à direção do vento
$A_s$	Área molhada do elemento
$A_t$	Área da seção transversal do túnel de vento
B	Largura da edificação
C	Semi-comprimento projetado de onda da corrugação
$C_0$	Coefficiente máximo de pressão externa (no ponto de estagnação)
$C_D$	Coefficiente de arrasto do vento
$C_{ij}$	Parâmetros dos enrijecedores
$C_L$	Coefficiente de levantamento do vento
$C_p$	Coefficiente de pressão
$C_{pe}$	Coefficiente de pressão externa
$C_{pi}$	Coefficiente de pressão interna
D	Diâmetro do cilindro do silo
$D_f$	Rigidez à flexão da casca cilíndrica, $Et^3/[12(1-\nu^2)]$
D1	Submatriz dimensional dos parâmetros determinantes
D2	Submatriz dimensional das grandezas diretrizes e da incógnita do problema
E	Módulo de elasticidade longitudinal
$E_f$	Módulo de elasticidade efetivo da estrutura
$E_u$	Número de Euler
$F_r$	Fator de rajada
G	Módulo de cisalhamento
H	Altura do cilindro do silo
$H_T$	Altura da seção do túnel
$I_\theta, I_{\theta z}, I_z$	Momentos de inércia equivalentes

I	Intensidade de turbulência
$I_x$	Momento de inércia em relação ao eixo x
$J_e$	Número de Jensen
L	Comprimento
$L_1$	Comprimento médio dos turbilhões do vento na direção longitudinal
M	Massa
$OV_i$	Vetor que vai da vista $V_i$ ao ponto de visada no modelo
P	Ponto de medição dos deslocamentos
R	Raio do cilindro do silo
$R_e$	Número de Reynolds
$R_i$	Número de rugosidade, dado pela razão da altura ponderada do elemento para a altura média do elemento
S	Área de referência do modelo reduzido
$S(\eta)$	Densidade espectral da variância
$S_t$	Número de Strouhal
T	Tempo
$T_{vida}$	Tempo projetado de vida útil da estrutura do silo em anos
$T_c$	Intervalo de tempo característico, para definir a velocidade do vento tal que os turbilhões (ou redemoinhos), oriundos das flutuações, gerem rajadas de dimensões suficientes para envolver plenamente a edificação
U	Velocidade média do vento
$V_i$	Posições das câmeras $i=1, 2, 3$
$V_o$	Velocidade básica do vento, segundo a NBR 6123
W	Deslocamento na direção radial do cilindro
$X_{ij}$	Coordenada da câmera; i representa o número da câmera, $i = 1, 2, 3$ e j a direção de filmagem, $j = 1, 2, 3$
Z	Parâmetro de Batdorf, $Z=(L^2/Rt)\sqrt{(1-v^2)}$

**Latinos minúsculos**

$a_{ij}$	Parâmetros de composição das influências dos enrijecedores entre si
$b$	Altura da cobertura cônica do silo
$b_f$	Largura nominal da mesa ou do conjunto mesa - enrijecedores de borda
$b_g$	Largura da frente do obelisco
$b_w$	Largura nominal da alma
$c$	Constante que relaciona $h_k$ e $z_o$
$c_b$	Altura da barreira
$d$	Altura da corrugação da chapa; largura do enrijecedor de borda
$d_s$	Distância entre dois enrijecedores verticais (colunas do cilindro do silo)
$d_t$	Distância entre dois anéis enrijecedores (medida na vertical)
$e$	Espessura da chapa do perfil metálico
$f$	Frequência
$f_y$	Resistência ao escoamento do aço
$f_u$	Resistência última do aço na tração
$g$	Aceleração da gravidade da Terra, $9,81 \text{ m/s}^2$
$h_k$	Altura característica dos obstáculos do terreno na vizinhança da edificação
$h_n$	Altura das nervuras externas ao cilindro
$h_g$	Altura dos geradores de vórtices
$k$	Coefficiente de perda de estabilidade, que depende de $H/D$ e das condições de contorno
$m$	Número de semi-ondas de deformação longitudinal (direção da geratriz do cilindro) devido à perda de estabilidade
$n$	Número de semi-ondas de deformação no perímetro do silo
$p$	Pressão
$q_{cr}$	Valor efetivo da pressão crítica do vento
$q_{x,cr}$	Pressão crítica externa uniforme axissimétrica de perda de estabilidade
$q_{i,cr}$	Pressão crítica interna axissimétrica de subpressão



$q$	Pressão dinâmica do vento
$q_{e,cr}$	Pressão de estagnação crítica de referência
$r_i$	Raio interno de dobramento da chapa do perfil formado a frio
$r_x$	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal x
$r_y$	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal y
$t$	Espessura da chapa da casca cilíndrica ou do elemento do perfil dobrado
$t_n$	Espessura da nervura
$t_\theta, t_{\theta z}, t_z$	Espessuras equivalentes
$u$	Deslocamento na direção da geratriz do cilindro
$v$	Deslocamento na direção tangencial do cilindro
$x$	Coordenada tangencial da estrutura cilíndrica do silo
$y$	Coordenada radial da estrutura cilíndrica do silo
$z$	Coordenada da altura em relação ao nível do terreno
$z_0$	Comprimento de rugosidade aerodinâmico
$z_g$	Altura gradiente da camada limite atmosférica

### **Latinos subscritos**

a	Indica arrasto
b	Indica barreira para gerar um déficit de quantidade de movimento no túnel
cal	Indica valor de cálculo
col	Indica que o parâmetro refere-se às colunas do corpo do silo protótipo
exp	Indica que o valor do parâmetro é obtido experimentalmente
cr	Indica situação crítica (perda de estabilidade)
i, j, k	Indicam numeração de vetor
loc	Indica que o parâmetro é local
m	Indica modelo
n	Indica nervura no modelo
N	Indica que o parâmetro é normalizado em relação a um valor de referência

p	Indica protótipo
ref	Indica valor de referência
s	Indica sustentação
t	Indica valor total
v	Indica gerador de vórtices
T	Indica relação do parâmetro ao túnel de vento

### Gregos maiúsculos

$\Delta p$	Pressão efetiva do vento em um ponto da superfície do silo
$\Delta x_{ij}^k$	Deslocamento entre pontos do reticulado para as medições com imagens digitalizadas. Por exemplo, $\Delta x_{11}^1$ , $\Delta x_{11}^2$ , correspondem aos pontos $k = 1, 2$ (superescritos); o primeiro subscrito indica o número da vista, $i = 1, 2, 3$ , e o segundo, $j = 1, 2$ , a direção horizontal (1) ou vertical (2).
$\Lambda$	Pressão adimensional, $(C_{pe} - C_{pi})qR^3/D_f$
$\Pi$	Expressa relação de escalas das grandezas existentes no protótipo e no modelo

### Gregos minúsculos

$\alpha$	Expoente empírico da expressão de velocidade do vento
$\beta$	Razão entre o comprimento de onda longitudinal e o comprimento de onda circunferencial
$\chi$	Razão entre a pressão crítica de subpressão interna axissimétrica, $q_{i,cr}$ , e a pressão crítica efetiva do vento, $w_{kr}$ ,
$\delta$	Deslocamento radial da parede do silo
$\gamma$	Densidade do material
$\eta$	Frequência de flutuações da velocidade do vento
$\eta_c$	Frequência de corte ou de Nyquist
$\eta_e$	Frequência natural da estrutura
$\eta_s$	Frequência de descolamento

$\lambda$	Fator de escala de semelhança
$\delta_L$	Espessura da camada limite
$\lambda_{cr}$	Pressão crítica adimensional
$\mu_0$	Viscosidade dinâmica do ar, $17,894 \times 10^{-6}$ kg/ms
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\nu_0$	Viscosidade cinemática do ar, $\mu_0/\rho_0$
$\theta$	Ângulo; pode ser referido ao ângulo de descolamento da camada limite do cilindro
$\theta$	Ângulo de transição, no cilindro, entre a camada limite laminar e a turbulenta
$\rho_0$	Densidade do ar ( $1,225$ kg/m <sup>3</sup> atmosfera padrão internacional ao nível do mar)
$r(\tau)$	Função de autocorrelação normalizada
$r_s$	Massa estrutural volumétrica (massa da estrutura dividida pelo volume total que ela ocupa)
$s$	Desvio padrão da velocidade média do vento
$s_k$	Tensão característica do material
$\tau$	Defasagem temporal

## RESUMO

ANDRADE JUNIOR, L.J. de (2002). *A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro*. São Carlos, 2002. 151p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os silos metálicos cilíndricos de chapa corrugada e cobertura cônica são as unidades mais utilizadas no Brasil para o armazenamento de produtos granulares. As principais ações variáveis que atuam sobre os silos são as pressões devidas aos produtos armazenados e ao vento, sendo esta ação crítica quando o silo se encontra vazio. Devido à grande eficiência estrutural da forma cilíndrica e à resistência elevada do aço, estas estruturas são leves e delgadas e, portanto, suscetíveis a perdas de estabilidade local e global e arrancamento. Com a finalidade de avaliar estes efeitos foram realizados estudos teóricos e experimentais sobre as ações do vento em silos. O trabalho foi desenvolvido com ensaios de modelos aerodinâmicos e aeroelásticos em um túnel de vento na Universidade de Cranfield, Inglaterra, com o objetivo de determinar os coeficientes aerodinâmicos no costado e na cobertura. Os resultados mostram que os valores dos coeficientes recomendados pela Norma Brasileira de vento, NBR 6123 (1990), são adequados para o costado. Para a cobertura cônica, como não são especificados pela NBR, são recomendados valores dos coeficientes aerodinâmicos determinados nos ensaios. Conclui-se também que a colocação externa das colunas é a favor da segurança e que o uso de anéis enrijecedores no costado é indicado e muito importante para a estabilidade local e global da estrutura do silo.

Palavras-chave: silos; ação do vento; modelos aerodinâmico e aeroelástico; coeficientes aerodinâmicos.

## **ABSTRACT**

ANDRADE JUNIOR, L.J. de (2002). The wind action on cylindrical silos of low height/diameter ratio. São Carlos, 2002. 151p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The steel cylindrical silos made of corrugated sheets with conical roofs are the most used units to the storage of granular materials. The main silo loads are the pressures due to the stored material and to the wind, being this action the critical one when the silo is empty. Due to the high efficiency of the cylindrical form and to the high strength of the steel, these structures are thin and light-weight and, as a consequence, susceptible to the loss of local and global stability and to the pull out of the structure. With the aim to assess these effects related to the wind loading in silos, some theoretical and experimental studies were conducted. The work was carried out with aerodynamic and aeroelastic models tested in a boundary layer wind tunnel in the University of Cranfield, England, with the objective to determine the aerodynamic coefficients of the cylinder and the conical roof. The results show that the coefficients of the Brazilian Code of wind loads, NBR 6123 (1990), are adequate to the cylinder. The coefficients to the conical roof are suggested based on our tests, considering that there are no values specified by the NBR. As well it is concluded that the outside columns is on the side of safety and it is indicated the use of wind rings attached to the cylinder, which are very important to the local and global stability of the silo structure.

Keywords: silos; wind loads; aerodynamic and aeroelastic models; aerodynamic coefficients.

# 1. INTRODUÇÃO

---

---

## 1.1. Considerações

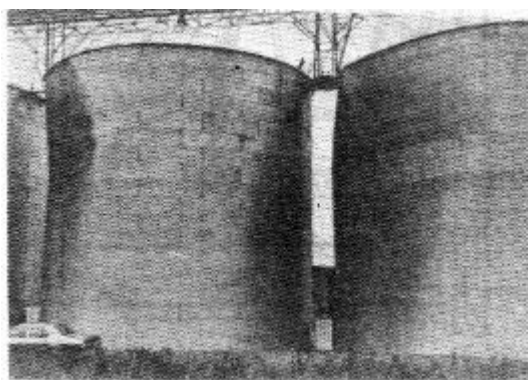
Os silos metálicos cilíndricos de chapa corrugada e cobertura cônica são as unidades mais utilizadas no Brasil para o armazenamento de produtos granulares, porque são eficientes, de baixo custo e de fácil montagem, seja em fazendas, cooperativas ou agroindústrias.

Este tipo de silo contém um arranjo estrutural de muitos elementos, sendo classificado em função do aspecto do silo, dado pela relação altura/diâmetro,  $H/D$ , do cilindro:  $H/D \leq 0,5$ —curto;  $0,5 < H/D \leq 1,5$ —médio ou intermediário;  $H/D > 1,5$ —longo. O cilindro, ou costado, é composto em chapas metálicas corrugadas do tipo arco e tangente unidas por linhas duplas de parafusos, que garantem a continuidade da casca cilíndrica. A cobertura cônica é composta em painéis de chapas metálicas com dobras na direção da geratriz do cone, ligadas por parafusos. O costado é assumido rotulado à base, que pode ser rígida e, dependendo das dimensões do silo, é reforçado com enrijecedores verticais ou colunas metálicas de seção-U dispostas no perímetro e, opcionalmente, com vigas curvas ou anéis metálicos circunferenciais de seção tubular (anéis enrijecedores) ao longo da altura. A cobertura cônica também pode dispor de reforços com vigas radiais e circunferenciais. O fundo é, em geral, plano podendo contar com abertura circular central para o escoamento do produto. Devido a esta característica são chamados de silos com fundo plano e têm dimensões comerciais que variam de 3 m a 32 m de diâmetro por 3 m a 30 m de altura, que servem para armazenar volumes de  $20 \text{ m}^3$  até  $26.000 \text{ m}^3$ . Todo este conjunto encontra-se diretamente apoiado sobre uma base, com o costado fixo por parafusos a um anel rígido de concreto que é independente da base do fundo.

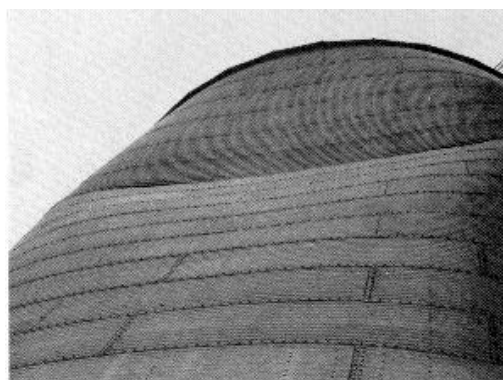
## 1.2. Definição do problema

Como consequência da grande eficiência estrutural da forma cilíndrica e da resistência elevada do aço, são estruturas leves, de chapas delgadas e de grandes dimensões em relação ao peso-próprio, o que torna este tipo de silo susceptível ao problema de perda de estabilidade local e global da estrutura.

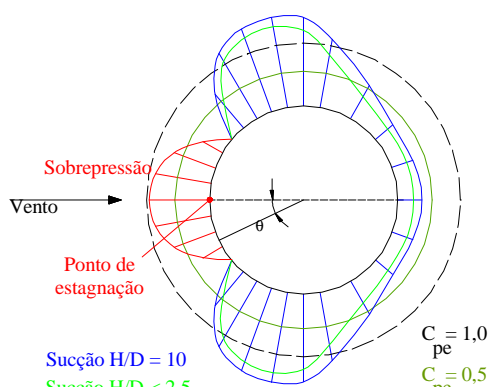
Por conseguinte, os estados limites mais importantes para os silos metálicos são as perdas de estabilidade por compressão do costado devidas às ações de atrito com a parede dos produtos armazenados e devidas às pressões do vento (Figuras 1, 2 e 3), e o arrancamento do costado (que se encontraria fixo à base) (Figura 4).



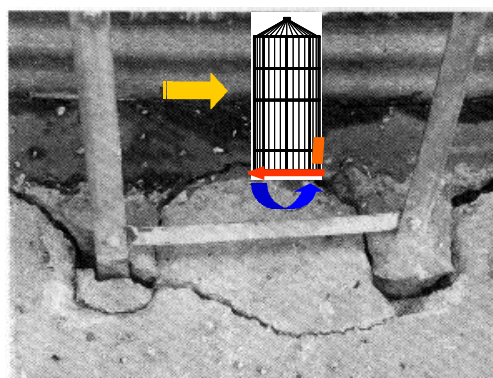
**FIGURA 1 - Perda de estabilidade do costado de silos na Austrália (ANSOURIAN 1985)**



**FIGURA 2- Perda de estabilidade do costado de um silo na Espanha (RAVENET 1992)**



**FIGURA 3 - Distribuições de pressões (NBR6123 1990)**



**FIGURA 4 - Efeito de tombamento (RAVENET 1992)**

Neste estudo são avaliados os efeitos do vento nos silos curtos e médios na condição de estarem vazios ou parcialmente preenchidos. Quando estão quase ou totalmente carregados os silos metálicos de fundo plano e diretamente apoiados no solo possuem grande massa e dificilmente sofrem danos devidos ao vento.

O enfoque é empírico, com ensaios físicos de modelos curto e médio em túnel de vento, que servem à obtenção das distribuições de pressão e dos coeficientes aerodinâmicos, considerando-se o posicionamento interno e externo das colunas e dos elementos enrijecedores na cobertura. Além disto, foi ensaiado um modelo flexível que refletiu a interação da estrutura do silo com o vento.

Até o ano 2001, no Brasil, não estava disponível de um túnel de vento para atender a esta necessidade, pois o do CTA serve para experimentos em escoamento com turbulência reduzida e o da UFRGS estava impedido pela mudança do LAC. O túnel da COPPE-UFRJ serve para experimentos meteorológicos. À época estava em construção no LAE da EESC-USP um túnel com  $2 \text{ m}^2$ , porém a data prevista para seu funcionamento, meados de 2002, foi inadequada ao desenvolvimento desta tese.

Os ensaios deveriam ser realizados em um túnel de vento de pelo menos  $1,5 \text{ m}^2$  de seção da câmara de ensaio. Deste modo, ao serem aplicadas as leis de semelhança e de redução de escala derivadas da análise dimensional, os modelos flexíveis teriam espessuras da casca e das nervuras suficientes para serem escolhidos materiais adequados à sua construção e observados os movimentos do costado.

Deste modo, foi realizado um programa de ensaios junto à Universidade de Cranfield, Inglaterra, com o apoio do CNPq, no túnel de vento de camada limite da Faculdade de Aeronáutica (College of Aeronautics), de 9 m de comprimento e seção retangular na câmara de ensaios de  $8 \times 4$ -ft, ou  $1,22 \times 2,44$  m, o que dá  $3,0 \text{ m}^2$ .

O trabalho inicia-se com uma revisão bibliográfica do problema da ação do vento nos silos metálicos que mostra os métodos usados para a avaliação e as soluções deste problema. A partir dela compõe-se uma metodologia sobre ensaios em túnel de vento e análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos.

Com o estudo dos modelos em túnel de vento, é fornecido um conjunto de dados de distribuições de pressões no corpo cilíndrico e na cobertura cônica e os modos de deformação de silos. Também são feitas avaliações e análises que fundamentam o engenheiro estrutural ao cálculo destas estruturas à ação do vento.



### **1.3. Fundamentos**

Os fundamentos são mostrados com o intuito de esclarecer o problema da ação do vento sobre os silos. São apresentados conceitos sobre o escoamento de ar na atmosfera e os fenômenos decorrentes da interação deste escoamento com corpos cilíndricos, e os testes e modelos que podem ser usados no estudo da resposta daqueles corpos à ação do vento. As informações sobre os conceitos de escoamento de ar e sua interação com corpos cilíndricos são extraídas de LAWSON (1980) e BLESSMANN (1983), sobre os testes e modelos são do ASCE (1997) e KOLOUŠEK et al. (1984).

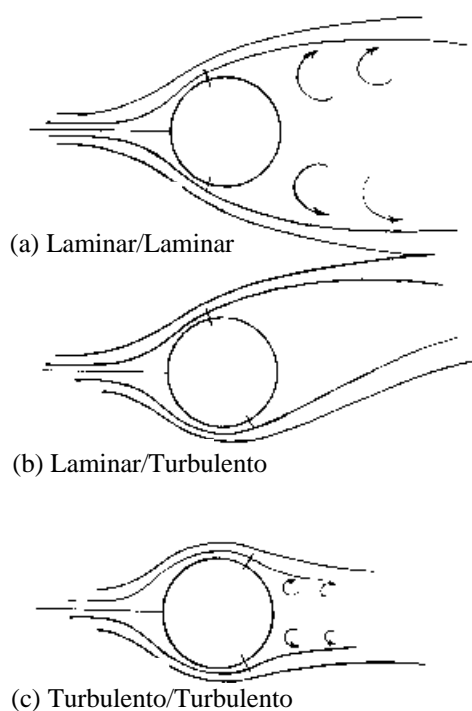
Os silos estão situados na superfície terrestre e sofrem a ação dos movimentos do ar na atmosfera. As características do escoamento que atua sobre eles dependem das condições topográficas, meteorológicas e da distribuição de edificações e obstáculos naturais em suas vizinhanças. Cabe, portanto, esclarecer os mecanismos de escoamento e sua interação com a estrutura do silo.

A mudança de escoamento laminar para turbulento (isso ocorre apenas neste sentido em escoamento subsônico) é relevante para as forças aerodinâmicas e é governada por três fatores: i) Número de Reynolds; ii) Turbulência do vento, iii) Rugosidade do terreno.

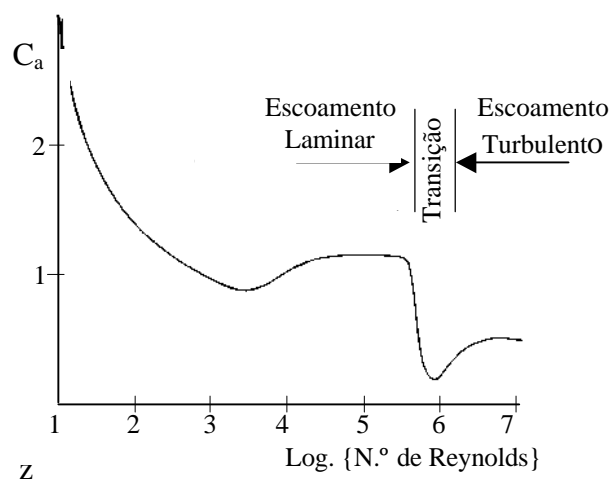
Para valores pequenos do número de Reynolds, as forças viscosas são grandes comparadas às acelerações do ar e, como as forças viscosas sempre opõem-se ao movimento, quaisquer movimentos arbitrários do ar são amortecidos e persiste o escoamento laminar. Para um valor crítico do número de Reynolds a força de amortecimento torna-se insignificante para amortecer as oscilações do escoamento e aparece o escoamento turbulento.

O exemplo clássico de diferença entre descolamento laminar e turbulento ocorre em um cilindro. Um esboço do escoamento é mostrado na figura 5, extraída de LAWSON (1980). Na figura 5(a) o número de Reynolds é baixo e a separação ocorre a um ponto da superfície do cilindro a  $80^\circ$  a partir do ponto de estagnação, onde a velocidade do vento é nula. Neste ponto, as linhas de escoamento do ar divergem, tal que a esteira continua assim a divergir, tornando-se muito larga antes

do afinilamento necessário às camadas cisalhantes que a limitam provocarem a sua coalescência. Por outro lado, a figura 5(c) mostra separação turbulenta, que ocorre a uma posição angular de  $\approx 120^\circ$ , em que as linhas de escoamento estão novamente convergindo tal que a esteira é muito mais estreita. A variação do coeficiente de arrasto (componente da força na direção do vento) com o número de Reynolds é mostrada na figura 6 e a transição é apresentada claramente. Nesse momento o coeficiente de arrasto para o escoamento turbulento é menor que aquele para o escoamento laminar, em contradição à idéia básica que o arrasto turbulento é sempre maior que o arrasto laminar. A razão para os valores diferentes para o coeficiente de arrasto é a diferença de largura das esteiras, tal que se torna óbvio que a turbulência pode ser benéfica se ela move o descolamento para um local mais adequado.



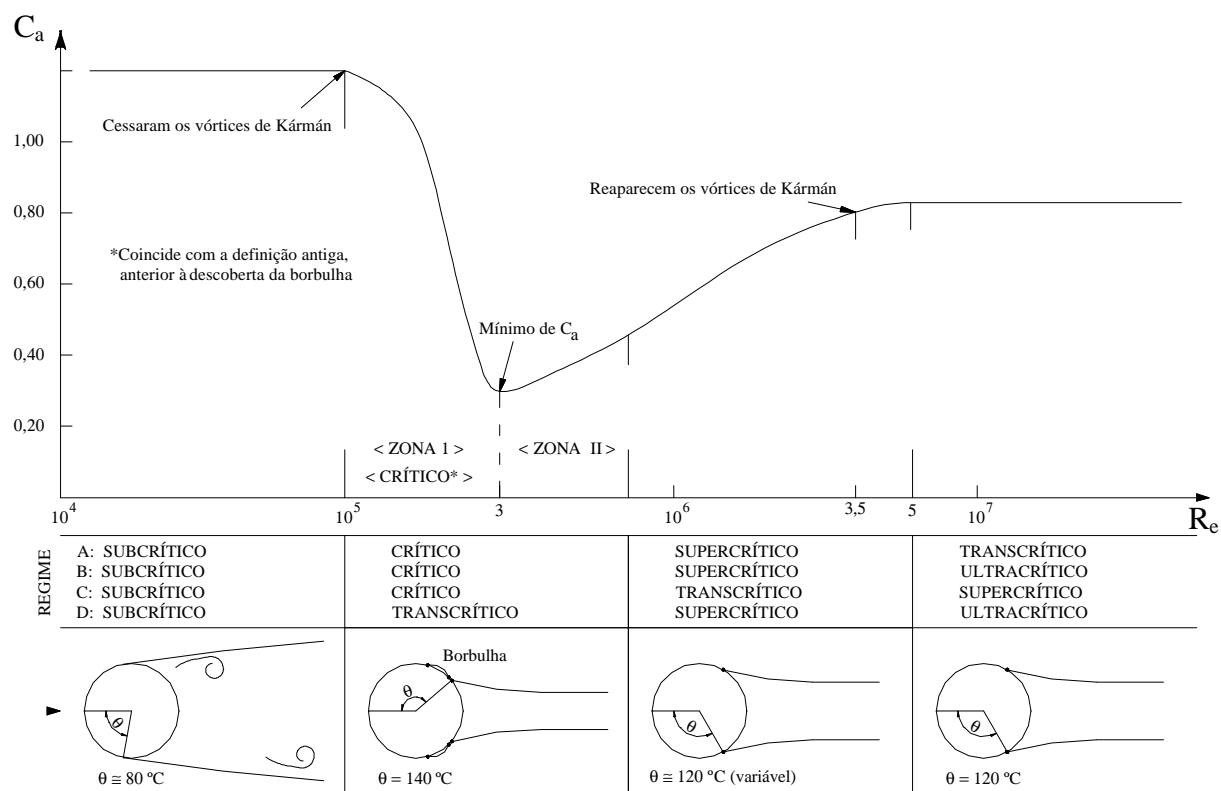
**FIGURA 5 - Tipos de separação de escoamento em cilindro (LAWSON 1980)**



**FIGURA 6 - Variação do Coeficiente de arrasto com o número de Reynolds em cilindro (LAWSON 1980)**

Sobre o problema de fluxo em torno de cilindros circulares, BLESSMANN (1983) explica que para os regimes característicos a súbita alteração do fluxo e do

coeficiente de arrasto é devido à mudança da camada limite de laminar para turbulenta. A explicação clássica é que isto se deve ao aumento de velocidade do escoamento e, conseqüentemente do número de Reynolds. Devido ao aumento da quantidade de movimento na camada turbulenta, comparado ao da laminar, a separação ocorre mais a sotavento, em torno de  $120^\circ$  a  $130^\circ$ . Entretanto, BLESSMANN (1983) aponta que esta explicação merece alguns reparos. Entre a separação laminar e a separação turbulenta aparece a borbulha, que pode ser explicada em termos do regime característico do fluxo em torno de cilindros, conforme a figura 7:



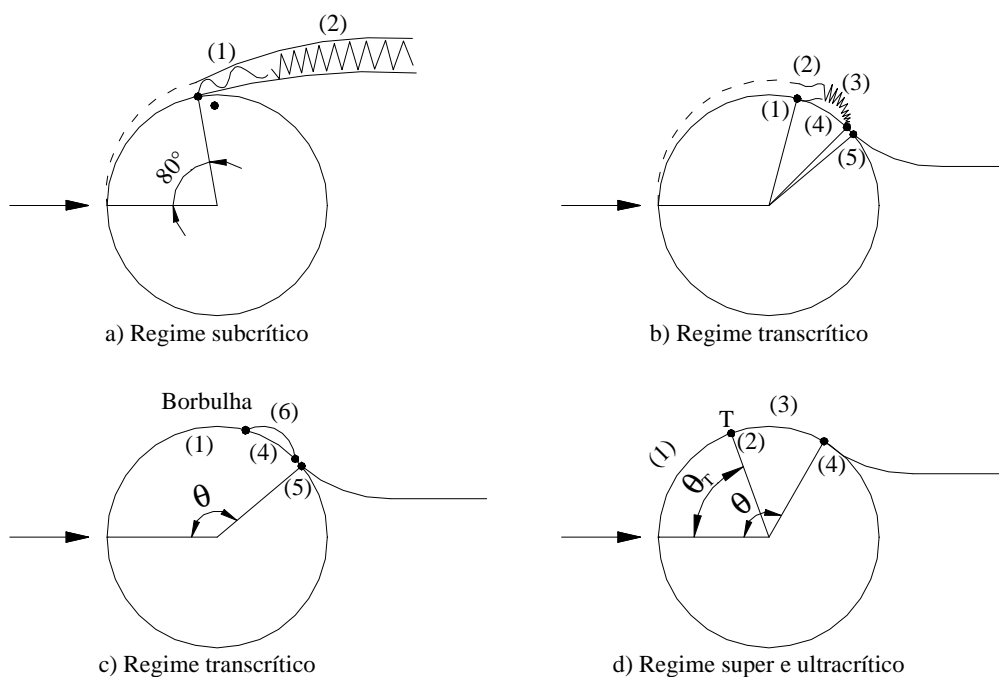
Os valores de  $Re$  são apenas ilustrativos

**FIGURA 7 – Regimes característicos do fluxo em torno de cilindros  
(BLESSMANN 1983)**

O que ocorre com o fluxo na zona de descolamento (ou separação) é mostrado na figura 8. A descrição é relativa ao número de Reynolds e em termos dos regimes supracitados (vide figura 7):

- i) **Regime subcrítico** ( $10^4 < R_e < 10^5$ ): a separação é totalmente laminar e ocorre em  $\theta = 80^\circ$ . Para  $R_e$  em torno de 50.000 a transição da camada limite laminar para turbulenta se dá muito próxima ao ponto de separação, contudo depois da separação. Em relação às regiões, dadas na figura 8 a), a região (1) é a de instabilidade, onde ocorrem as ondas ditas de Tollmien-Schlichting. Estas ondas são promovidas pela camada limite laminar separada e que finalmente geram a turbulência indicada na região (2), já afastada do cilindro.
- ii) **Regime transcrito** ( $10^4 < R_e < 10^5$ ): Neste regime ocorre separação laminar em (1) a aproximadamente  $105^\circ$ , com ondas de Tollmien-Schlichting em (2), com oscilações da turbulência em (3) são muito próximas ao cilindro e ocorre um recolamento turbulento em (4), e uma segunda separação em (5), turbulenta, como mostrado na figura 8 b). Pode haver ainda uma formação de borbulha entre a separação laminar e o recolamento turbulento, como ilustrado na figura 8 d). O ângulo de separação é  $140^\circ$ , indicado no ponto(5).
- iii) **Regime supercrítico** ( $5 \times 10^5 < R_e < 5 \times 10^6$ ): Não ocorre mais a borbulha porque a camada limite torna-se turbulenta antes da separação. O ângulo de descolamento  $\theta$  e o ângulo de transição  $\theta_T$  entre a camada limite laminar e a turbulenta são variáveis.
- iv) **Regime ultracrítico** ( $R_e > 5 \times 10^6$ ): A forma do fluxo se mantém igual ao do regime supercrítico, mas o coeficiente de arrasto torna-se independente do  $R_e$ .

BLESSMANN (1983) cita ainda que o número de Reynolds crítico, ou seja, aquele em que o fluxo é muito sensível a qualquer perturbação, depende das características de turbulência do escoamento e das condições de acabamento da superfície do cilindro. Deste modo, quanto maior a intensidade longitudinal da turbulência, menor é o número de Reynolds crítico. Este aumento na turbulência também pode ser obtido com a colocação de elementos externos ao cilindro, que promoveram a redução no Reynolds crítico. Em resumo, ocorre uma queda súbita do coeficiente de arrasto para números de Reynolds entre 50.000 e 500.000. Como conclusão importante aponta que, para efeito de comparação de resultados em estudos diferentes, os fluxos em dois cilindros são semelhantes se os escoamentos têm as mesmas características de turbulência e os cilindros têm a mesma rugosidade relativa (semelhanças geométrica e cinemática).



**FIGURA 8 – Fluxo na zona de descolamento (BLESSMANN 1983)**

Sobre camadas limite atmosférica, relata-se que, quando o vento sopra sobre uma superfície, por exemplo, de um campo ou de uma cidade, uma força de atrito é exercida entre os dois. Devido às tensões viscosas e aos redemoinhos, a força de atrito é distribuída sobre uma fina camada de ar adjacente à superfície, produzindo um gradiente de velocidade. Esta região no escoamento é chamada "camada limite atmosférica" e, nela, as forças viscosas podem ser da mesma ordem das forças de inércia. Fora desta camada, as forças viscosas são muito pequenas quando comparadas às forças de inércia e podem ser desprezadas.

Segundo a descrição dada em BLESSMANN (1983), no caso de um corpo rombudo, como é o caso do silo de corpo cilíndrico e cobertura cônica, o escoamento principal do fluido é bloqueado pela esteira turbulenta de vórtices que se forma a sotavento. Esta esteira surge devido a fortes gradientes de pressão, que fazem a camada limite descolar da superfície do corpo, e a resistência de forma é muito maior que a de atrito, que raramente passa de 1% da resistência total.

Em relação ao estudo de edificações em túnel de vento, em KOLOUŠEK et al. (1984) é mostrado que os modelos aerodinâmicos devem atender apenas às condições de semelhança geométrica e representar a estrutura como um todo ou parcialmente, e não são modeladas a massa da estrutura, a rigidez e nem o

amortecimento. Esses modelos são usados em estudos dos fenômenos induzidos pela componente estática do vento (às vezes também pelas componentes flutuantes).

Os modelos aeroelásticos devem satisfazer todas as condições de semelhança, considerando-se massa, rigidez e amortecimento, sendo classificados em três grupos:

- a) Modelos aeroelásticos perfeitos, que representam todos os elementos resistentes de uma estrutura e satisfazem as condições de semelhança perfeita.
- b) Modelos aeroelásticos com as características dinâmicas concentradas na mesa de ensaio do túnel; o modelo é aerodinâmico e as características aeroelásticas são simuladas aproximadamente pela mesa.
- c) Modelos aeroelásticos simplificados cujo número de elementos estruturais é menor que aqueles da estrutura real. Neste grupo, o modelo de réplica é quase perfeito, e as condições de semelhança são quase que totalmente atingidas.

No sentido de simular em um modelo aeroelástico as características da estrutura real, é necessário entender como devem ser tratadas a casca cilíndrica corrugada e as ligações com as colunas, quais são os fatores que influenciam a perda de estabilidade e que, por sua vez, depende da forma inicial de deformação do sistema casca e colunas. Na tabela 1 são apresentados os fatores influentes na perda de estabilidade de cascas enrijecidas, conforme BECKER & GERARD (1962).

**TABELA 1 - Fatores influentes na estabilidade de cascas enrijecidas**

<b>MODOS DE PERDA DE ESTABILIDADE</b>
<b>LOCAL:</b> a casca perde estabilidade dentro dos painéis limitados pelo sistema enrijecedor
<b>PAINEL:</b> a casca e um conjunto de elementos enrijecedores perdem estabilidade dentro de um segundo conjunto de elementos enrijecedores - e.g., a casca e os elementos longitudinais entre os anéis, no caso da compressão axial.
<b>GERAL:</b> a casca e o sistema enrijecedor perdem a estabilidade como um todo.
<b>LIGAÇÕES DA CASCA AOS ENRIJECEDORES</b>
<b>MONOLÍTICA:</b> a ligação entre a casca e os enrijecedores é contínua, e.g., soldada continuamente, ou aparafusada em pequenos espaços.
<b>INTERMITENTE:</b> ligações espaçadas, com intervalos intermediários.

Para o entendimento do que é um teste aeroelástico, deve-se saber que forças aerodinâmicas são as forças devidas vento que atuam sobre a edificação. A aeroelasticidade serve para descrever a interação das forças aerodinâmicas e as deformações ou os movimentos da estrutura (ASCE 1997). Os estudos aeroelásticos tratam deste fenômeno e os modelos reduzidos que nele são usados devem reproduzir as deformações ou os movimentos da edificação real num ensaio em túnel de vento.

Em relação ao comportamento da estrutura, LAWSON (1980) mostra que à medida que a rigidez da estrutura diminui ocorrem três situações diferentes mas relacionadas. A frequência natural de uma estrutura extremamente rígida é muito alta - tão alta para ser excitada pelo vento e mecanismos de turbulência. Para estruturas menos rígidas, a menor frequência natural diminui até que ela esteja em uma faixa de frequências que possa ser excitada por um ou mais mecanismos. A segunda situação é que, com rigidez reduzida, o movimento da estrutura aumenta e, em muitos casos, as forças do vento na estrutura deformada são diferentes daquelas na estrutura indeformada e ocorre um fenômeno "aeroelástico". O termo aeroelástico foi adotado no campo aeronáutico para definir onde a elasticidade da aeronave modifica as suas cargas aerodinâmicas. Estas duas situações são acopladas a uma terceira: quanto menor a rigidez, maior o movimento, logo ocorrem as forças inerciais, referentes à massa e à aceleração, que podem ser maiores que as forças aerodinâmicas.

#### **1.4. Objetivos**

Com base no estudo em túnel de vento da interação do ar com os modelos reduzidos de corpo cilíndrico e cobertura cônica, objetiva-se determinar as distribuições e os coeficientes aerodinâmicos de pressão no perímetro do corpo e da cobertura do silo, para as condições dos enrijecedores posicionados interna e externamente às paredes dos modelos de relação  $H/D=0,5$  e  $H/D=1,0$ , e o número das ondas de deformações, com as magnitudes dos maiores deslocamentos, do modelo de relação  $H/D=1,0$  na região do cilindro a barlavento.

A proposta do presente trabalho vai além do que foi realizado nos artigos citados na revisão bibliográfica, pois está fundamentada numa determinação criteriosa dos parâmetros de redução de escala com a análise dimensional nos ensaios em túnel de vento. Esta metodologia permite que sejam obtidos os coeficientes aerodinâmicos de pressão, de arrasto e de sustentação para os modelos aerodinâmicos, considerando-se o posicionamento externo das colunas e de elementos externos na cobertura para a quantificação, com os coeficientes supracitados, do alívio de sucção na cobertura, e seja observado o comportamento da estrutura do silo com colunas externas, em termos do número de ondas de deformações, com as magnitudes dos maiores deslocamentos nas regiões do cilindro a barlavento, para o modelo aeroelástico correspondente ao modelo aerodinâmico de relação  $H/D = 1,0$ .

A consideração dos elementos na superfície externa do silo e a análise do comportamento de um modelo aeroelástico caracterizam as contribuições originais no campo de estudo das ações do vento em silos de corpo cilíndrico e de cobertura cônica, abrangendo particularmente os silos metálicos.

### **1.5. Justificativa**

Existem muitos acidentes em silos deste tipo devidos às ações do vento e, portanto, há a necessidade de esclarecimentos sobre o comportamento dos silos metálicos de chapas corrugadas para um projeto e um dimensionamento corretos.

A ação do vento pode deformar elasticamente a parede lateral da estrutura cilíndrica e flexível de um silo metálico, de modo que se admite a hipótese que essas deformações podem introduzir esforços adicionais que não ocorrem em estruturas rígidas. A avaliação destes esforços é tarefa muito complexa para ser efetuada analiticamente, pois envolve a interação do vento com a estrutura, e somente o equacionamento do escoamento de ar impõe condições dificilmente manipuláveis e severas, que condicionam a poucas e restritas soluções. Uma possibilidade para esta avaliação é o ensaio de estruturas em túnel de vento que usualmente é feito com



modelos reduzidos. Estes modelos, em geral, são muito rígidos e servem para avaliar o escoamento de ar sobre as estruturas rígidas, de onde se derivam os coeficientes de pressão e, a partir deles, extrapolam-se os esforços na estrutura real.

Para que, além daqueles coeficientes, sejam avaliados os esforços na estrutura oriundos da interação do vento com a estrutura, o ensaio deve ser feito com um modelo reduzido que reflita essa interação. A esse tipo de ensaio associam-se testes chamados aeroelásticos. Saliente-se ainda que estes estudos, como o próprio nome sugere, são limitados ao comportamento elástico da estrutura, e a principal vantagem do teste aeroelástico neste trabalho é a informação direta do fenômeno dos deslocamentos da estrutura cilíndrica do silo, e não os efeitos aeroelásticos da interação entre o vento e a estrutura.

Pretende-se observar com o modelo flexível as deformações do corpo cilíndrico. Não há interesse particular nos efeitos aeroelásticos, ou seja, na modificação, se houver, das forças aerodinâmicas devidas ao movimento da estrutura induzido pelo vento.

Para a realização dos testes aeroelásticos são modeladas as características de momento de inércia, de massa e de rigidez da estrutura real no modelo reduzido, conjuntamente às condições de similaridade do escoamento de ar e da geometria exterior da estrutura.

## **2. AÇÕES DO VENTO EM SILOS: ESTADO DA ARTE**

---

---

Na revisão bibliográfica há o propósito de se mostrar o estado da arte para os métodos utilizados no estudo dos problemas de perda de estabilidade e no arrancamento das estruturas de silos metálicos submetidos à ação do vento.

Devida à vasta abrangência desse estudo, a revisão divide-se em três áreas:

- Mecânica das Estruturas
- Engenharia do Vento
- Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos

Os aspectos daqueles problemas são mostrados sob a ótica de cada área, expostos de maneira a formar uma visão geral, contendo as particularidades e dificuldades, bem como os êxitos e resultados obtidos. Não é pretensão relatar toda a literatura existente e consultada, mas perquirir as publicações mais recentes e apresentar aquelas fundamentais e que contribuem para o trabalho. Obviamente, a multidisciplinaridade impõe modos e notações diferentes que, dentro do possível, ou é feita uma analogia com os conceitos usuais ou uma apresentação na linguagem da engenharia de estruturas. No sentido de esclarece-los, é apresentado um glossário ao final do trabalho com os principais conceitos expostos no texto.

A exposição em cada área da revisão é feita de início sucintamente, mencionando-se os autores e os assuntos tratados por eles. Logo após, detalham-se os assuntos, relatando-se as hipóteses, os objetivos, os métodos e principalmente os resultados alcançados.

## **2.1. Área de Mecânica das estruturas**

Na área de **mecânica das estruturas** pesquisou-se sobre as propriedades equivalentes ortotrópicas de chapas corrugadas, destacando-se o trabalho de BRIASSOULIS (1986) e, sobre a estabilidade elástica de cascas ortotrópicas, o de BECKER & GERARD (1962). O objetivo foi reunir informações sobre as hipóteses e suposições utilizadas para a solução do problema de estabilidade da casca cilíndrica do silo de chapas metálicas corrugadas. A solução analítica é difícil para a distribuição não uniforme de pressão devida ao vento, sendo encontrado como resposta o valor da pressão crítica para cascas ortotrópicas cilíndricas sob pressão uniformemente distribuída externa (pressão de gás), em BECKER & GERARD (1962) e BRUSH & ALMROTH (1975).

No campo experimental, ainda relativo ao problema de perda de estabilidade, são importantes como fontes de hipóteses, conceitos e comparação de métodos empregados os trabalhos de RESINGER & GREINER (1981) e UEMATSU & UCHIYAMA (1985). Salienta-se que nestes trabalhos foram pesquisados modelos cilíndricos isotrópicos em túnel de vento.

A literatura que trata do estudo do comportamento de cascas ao vento traz estudos com simulações numéricas, cujos resultados são parâmetros para a ancoragem do silo em BRIASSOULIS & PECKNOLD<sup>1</sup>(1986), distribuições de esforços na casca cilíndrica enrijecida e na cobertura do silo em BRIASSOULIS & PECKNOLD <sup>2,3</sup> (1986), e parâmetros para projeto em ANSOURIAN (1992), e TRAHAIR et ali (1983).

Em BRIASSOULIS (1986) é realizado um estudo sobre as propriedades ortotrópicas equivalentes de chapas corrugadas. Este estudo fundamenta-se na hipótese que uma casca corrugada pode ser analisada como uma casca equivalente ortotrópica de espessura uniforme. Para a equivalência, assume-se que a geometria das corrugações é pequena quando comparada às dimensões importantes da estrutura, e admite-se um estado de deformação constante em um elemento de chapa.

Os objetivos no artigo foram revisar as expressões analíticas para as rigidezes equivalentes de casca ortotrópica delgada, modificando-as, quando necessário, para obter melhor simulação da casca corrugada. Derivaram-se também expressões analíticas para os esforços não uniformes desenvolvidos na casca corrugada, a partir dos quais são obtidas as concentrações correspondentes de tensões.

O método usado para serem atingidos os objetivos é simular uma porção representativa da casca corrugada com elementos lagrangianos degenerados e derivar as expressões das rigidezes equivalentes aplicando-se a eles estados de deformação constante e calculando-se as tensões desenvolvidas. As rigidezes resultantes são comparadas àquelas obtidas pelas expressões analíticas, sendo derivadas expressões melhoradas pelo segundo teorema de Castigliano. Por simplicidade, consideram-se elementos planos, na hipótese que o raio seção transversal da estrutura (e.g. silo cilíndrico) é muito grande quando comparado à altura das corrugações.

Há neste artigo uma interessante observação acerca do modo de falha das chapas devido aos conectores (e.g. parafusos). Trata-se de silo metálico em que são usados parafusos de aço de alta resistência em cada corrugação, para garantir continuidade entre as chapas. Neste caso, o modo usual de falha é a perda de estabilidade elástica.

Como resultados são obtidas as expressões para o cálculo das rigidezes equivalentes e as tensões máximas nas corrugações, o que torna possível uma análise para se verificar o escoamento local das chapas.

Em se tratando de estabilidade elástica de cascas ortotrópicas, em BECKER & GERARD (1962) é derivada uma teoria de pequenos deslocamentos para a perda de estabilidade geral de cascas ortotrópicas cilíndricas sob pressão externa. O objetivo é correlacionar os dados teóricos com os experimentais. Admite-se que a

casca enrijecida consiste em uma casca isotrópica ligada a elementos lineares discretos, ou seja, há um número pequeno de enrijecedores relativamente muito espaçados e, portanto, uma descontinuidade de propriedades físicas geométricas que podem ser diferentes em duas direções.

O método utilizado é o equacionamento diferencial parcial para a perda de estabilidade de um cilindro enrijecido sob carregamento uniforme, admitindo-se: i) teoria linear de pequenos deslocamentos, ii) o cilindro comporta-se elasticamente, iii) coeficiente de Poisson igual a zero.

Quanto aos termos de rigidez, indica-se que são interpretados como fisicamente efetivos, o que requer uma avaliação se a estrutura é monolítica ou se ocorre instabilidade local ou em um painel antes da instabilidade geral. Para o estudo em questão, é de suma importância quando BECKER & GERARD (1962) afirmam que, para a pressão externa axissimétrica, há pouca diferença entre as rigidezes obtidas das propriedades geométricas das seções transversais e as rigidezes físicas.

Para o estudo dos resultados, utiliza-se o parâmetro  $Z$  de Batdorf como abscissa para a composição de gráficos dos coeficientes de flambagem  $k$ . Este parâmetro  $Z$  é útil para dividir convenientemente quatro categorias de gráficos  $k$ - $Z$  ( $k$  - é o coeficiente de perda de estabilidade que depende da relação do cilindro (altura/diâmetro) e das condições de contorno). Desse modo, para placas ( $0 < Z < 1$ ), para cilindros curtos ( $1 < Z < 100$ ), cilindros moderadamente longos ( $100 < Z < 10.000$ ), e cilindros longos ( $Z > 10.000$ ). O método de análise é uma minimização numérica, com o objetivo de se traçar a curva  $k$ - $Z$  para cada conjunto de cilindros.

Os resultados são comparados para as teorias de pequenos e grandes deslocamentos e a conclusão é que, para pressão externa, o comportamento de grandes deslocamentos para cilindros enrijecidos contendo pequenas imperfeições iniciais é muito próximo ao dos cilindros perfeitos, ou seja, os dados para a falha devida à perda de estabilidade são bem aproximados pela teoria linear.

A teoria fornecida em BRUSH & ALMROTH (1975) é usada para o cálculo da perda de estabilidade de cascas cilíndricas lisas com enrijecedores, admitindo-se o mesmo material para toda a estrutura. As hipóteses e o método de cálculo são

semelhantes àqueles empregados por BECKER & GERARD (1962), para uma pressão externa uniforme e axissimétrica. As diferenças são as considerações da composição entre os enrijecedores e a casca lisa, das influências dos enrijecedores entre si e de seu posicionamento externo ou interno em relação à casca cilíndrica. Com o modelo fornecido é possível calcular a pressão crítica de perda de estabilidade em uma casca isotrópica com ou sem enrijecedores.

Em RESINGER & GREINER(1981) é tratada a perda de estabilidade em reservatórios cilíndricos metálicos de paredes delgadas e cobertura plana devida à ação não uniforme do vento. A hipótese é que no modo padrão de perda de estabilidade para sobrepressão constante há muitas ondulações de deformação, o que ocorre semelhantemente na região de pressão positiva do vento. Conclui-se que é razoável considerar constante a pressão do vento na região de sobrepressão, com valor igual à pressão máxima no ponto de estagnação. A vantagem é utilizar uma sobrepressão "equivalente" para se obter a pressão de perda de estabilidade.

Para esclarecer a questão, propõe-se no artigo uma série de ensaios, no Instituto para Estudo de Escoamento e Aerodinâmica da TU Graz, Alemanha, num túnel de vento com seção de 1 m x 2 m. Os modelos são cilíndricos em chapas de alumínio de  $t=0,1; 0,102; 0,105$  mm, fixadas a duas placas circulares rígidas ( $t=9$ mm), com  $D = 440$  e  $620$  mm e altura do cilindro  $H = 180; 250; 320; 440$  mm. A velocidade e pressão de estagnação máximas atingidas no túnel são  $40$  m/s e  $1.000$  N/m<sup>2</sup>.

A distribuição de pressão sobre a cobertura plana apresenta sucção sobre toda a superfície externa em que, na parte frontal (a barlavento), tem metade do valor da pressão de estagnação e, nas partes intermediária e a sotavento, a sucção diminui fortemente. Os fatores de minoração da pressão crítica teórica são comparados com os valores de pressão crítica de ensaio. Os fatores calculados variam de  $0,664$  a  $0,728$ , mostrando pequena dispersão relativa e conformidade com o valor mais indicado na literatura, que é igual a  $0,7$ . A relação do número de ondas de deformação de ensaio para o número teórico,  $m_{cr}/m$ , encontra boa concordância com o valor  $0,8$  da literatura.

A conclusão é que o comprimento de onda de deformação é quase independente da distribuição de pressão no perímetro. Portanto, quanto maior o número de semi-ondas de deformação no domínio de sobrepressão a barlavento do cilindro (de 16 até 32 confirmado pelos ensaios; extrapolado até 10 na equação) tanto menor é a influência da forma quase parabólica de redução da distribuição de pressão no domínio de estagnação do vento. Conseqüentemente, mais aproxima-se o valor da pressão crítica do vento daquele da pressão crítica axissimétrica.

No artigo de UEMATSU & UCHIYAMA (1985) são realizados ensaios em túnel de vento para avaliar o comportamento à perda de estabilidade de cascas cilíndricas de paredes delgadas, sem enrijecimento, e cobertura plana rígida.

Os ensaios no túnel são realizados nos regimes laminar e turbulento para verificar o comportamento de perda de estabilidade sob o efeito de intensidade de turbulência ( $I_u = 0,8\%$  laminar, e  $I_u = 8\%$  turbulento). Os cilindros dos modelos são em filme de poliéster, com extremidades engastadas a placas rígidas, com espessuras  $t$  que variam de 0,075 a 0,188 mm, raios  $R$  de 75 a 100 mm, e alturas  $H$  de 150 a 500 mm, com  $E = 5,55 \times 10^3$  MPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3. As geometrias são dadas pelas razões  $H/R$ , que varia de 2 a 7, e  $R/t$ , que varia de 532 a 1000. São feitas medidas dos modelos com um sensor fotônico antes dos ensaios, donde os autores concluem que as imperfeições são pequenas.

É relatado que, no regime laminar, a distribuição de pressão em torno do perímetro é pouco influenciada pelo número de Reynolds,  $Re$ , oposto ao que acontece no regime turbulento, em que a distribuição de pressão negativa é a que mais variou em função do  $Re$ . Para  $Re = 1,1 \times 10^5$  o máximo deslocamento radial foi em torno de metade da espessura da parede. Além disso, a oscilação de ovalização, ou simplesmente ovalização, cuja amplitude excede a espessura da parede, é excitada abruptamente a um  $Re$  um pouco maior que  $1,1 \times 10^5$ . Ao serem comparados esses resultados com os de um cilindro rígido, observa-se que a ovalização, juntamente com o deslocamento estático, altera a distribuição de pressão, em particular a parte negativa. Para se entender este fenômeno, são tomadas medidas das oscilações de ovalização com um voltímetro que indica o valor da média quadrática, ou r.m.s.

É definido um parâmetro adimensional  $\Lambda$  para a comparação entre as pressões dos ensaios para cilindros de diferentes  $H/D$ , com base na pressão máxima na parede da casca. À medida que  $\Lambda$  se aproxima da pressão crítica adimensional,  $\Lambda_{cr}$ , as componentes radiais de deformação tornam-se dominantes rapidamente. Com relação às pressões  $\Lambda_{cr}$  e modelos com mesma geometria, os desvios são pequenos - 5% em média - para os regimes laminar e turbulento, mesmo com uma grande diferença entre as pressões negativas. As relações entre  $\Lambda_{cr}$  e  $H/R$  e entre  $\Lambda_{cr}$  e  $R/t$  são postas em gráficos logarítmicos, sendo obtida, por mínimos quadrados, uma expressão empírica para a pressão crítica adimensional.

Em UEMATSU & UCHIYAMA (1985) nota-se que o  $n$ , número teórico de semi-ondas de deformação no perímetro, dá um limite de aplicabilidade ao conceito de pressão equivalente de RESINGER & GREINER (1981), ou seja,  $\chi$  atinge um máximo para  $n = 12$  e decai para  $n > 12$ . Os principais resultados obtidos são:

- Os deslocamentos são extremamente sensíveis à geometria da casca e à distribuição de pressão. Por outro lado, a pressão crítica depende principalmente da distribuição de pressão positiva;
- À medida que a pressão se aproxima da pressão crítica a relação pressão/deslocamento exibe uma forte não-linearidade;
- Os deslocamentos antes e após a perda de estabilidade concentram-se na região de estagnação; o comprimento de onda de deformação no perímetro torna-se menor com a redução de  $H/R$  e com o aumento de  $R/t$ ;
- A perda de estabilidade devida à pressão do vento não é sensível a imperfeições.
- O modo de perda de estabilidade observado foi de uma semi-onda ( $m = 1$ ) ao longo da altura e de três a quatro ( $n = 3$  ou  $4$ ) na direção circunferencial da região de pressões positivas do cilindro.

Em ANSOURIAN(1992) é encontrada uma revisão do problema de perda de estabilidade em silos e tanques metálicos. A primeira consideração é que, quando há cobertura, esta enrijece o topo, como se fosse um anel no topo do cilindro. Para o modo de perda de estabilidade, afirma-se que é uma semi-onda senoidal ao longo da altura. De interessante, fornece-se uma expressão simplificada para o cálculo da pressão crítica, fundamentada no conceito de pressão externa uniforme equivalente à



distribuição de pressão não uniforme do vento, que inclui os efeitos de restrição na direção da geratriz (meridional) do cilindro devidos às vinculações no topo e na base.

A pressão crítica de perda de estabilidade na região a barlavento é dada como o produto da pressão crítica de cálculo pelos fatores: i)  $C_b$ , que é o fator de rigidez decorrente da restrição meridional, com valores de 1,23 para a vinculação total em uma extremidade e 1,46 para vinculações totais nas duas extremidades do cilindro; ii)  $C_q$ , que é função do ângulo  $q$  da região de pressão positiva e do número  $m$  de ondas de deformação na direção meridional, e deve ser menor que 1,0; iii)  $C_s$ , que é o fator de imperfeição da casca, dado em função de  $m$ . Observe-se que este fator de imperfeição não é relevante para os silos com chapas metálicas corrugadas. Para cilindros com anéis, os autores sugerem que a resistência à perda de estabilidade seja analisada para o cilindro entre dois anéis consecutivos. Os anéis são verificados ao escoamento sob o efeito combinado de torção e de flexão.

Os conceitos, hipóteses e formulações para o cálculo da pressão crítica dados em TRAHAIR et alii (1983) são semelhantes aos de ANSOURIAN (1992). O que há de interessante é o tratamento dado ao cálculo e à verificação das chapas corrugadas.

Em BRIASSOULIS & PECKNOLD<sup>1</sup> (1986) são considerados os efeitos da pressão não uniforme do vento na ancoragem à base de silos cilíndricos de cobertura cônica. As distribuições de pressão do vento para o cilindro são estimadas por uma série de Fourier e os coeficientes de pressão para a cobertura cônica são fornecidos de forma simplificada por valores em faixas de distribuição perpendiculares à direção do escoamento, a partir de dados de abóbadas sobre cilindros devido à falta de dados específicos na literatura. As chapas corrugadas são consideradas equivalentes a uma casca ortotrópica e as expressões de membrana são aplicadas com boa aproximação dos resultados obtidos via MEF (usando-se um fator de redução que depende da relação H/D); ou seja, a expressão de membrana fornece valores por excesso. Alerta-se que a influência da cobertura aumenta drasticamente com a diminuição da altura para o diâmetro. Os efeitos do vento provocam falhas na ancoragem porque há um momento de tombamento do silo. São derivadas fórmulas para tração e cisalhamento nos chumbadores da base a partir da teoria de membrana, que são ajustadas aos resultados via MEF para três silos de H/D=2,4 (longo) - 0,9 (médio) - 0,5 (curto).

Em BRIASSOULIS & PECKNOLD<sup>2</sup> (1986) é discutida a estrutura do silo de chapas metálicas corrugadas, enrijecido vertical e circunferencialmente. A premissa é que a variação tridimensional da pressão do vento resulta em uma distribuição de pressões no silo que é muito diferente daquela produzida por uma pressão externa uniforme, e que há um mecanismo interativo entre a casca (corrugada) e os enrijecedores. É realçado o fato dos enrijecedores resistirem à pressão do vento, em que a modelagem numérica é igual à do seu artigo 1, apresentando-se gráficos de deslocamentos e de tensões. As configurações deformadas dos silos indicam que, para os silos médio e curto, não há deslocamento geral do topo na direção do vento. É afirmado que a cobertura contribui para esse comportamento (devido ao desprendimento do vento da superfície), e tanto mais influi quanto maior seja o diâmetro do silo, ou seja, a resultante das pressões na cobertura domina o padrão de deslocamento na parte superior da casca cilíndrica do silo curto. Aparentemente, o efeito local dos anéis não é evidente quando se observam os silos deformados, mas torna-se evidente quando são consideradas as distribuições de esforços.

O momento de tombamento devido à ação do vento é resistido em primeiro lugar pelas resultantes axiais (direção da geratriz do cilindro) desenvolvidas na base do silo. Contudo, há uma redistribuição dos esforços axiais em resposta à distribuição não uniforme de pressões do vento, porque é necessária ao equilíbrio local da casca. Observa-se que a rigidez à flexão da casca torna-se muito importante à medida que a ação torna-se mais oscilatória e, portanto, a rigidez à flexão da casca não pode ser ignorada neste aspecto.

Assim, quanto mais oscilatória a distribuição de pressão, mais pronunciado é o efeito da redistribuição axial de esforços. Os efeitos de flexão moderam esse efeito de redistribuição, porque a isto associam-se mais ondas de deformação e a flexão circunferencial e o cisalhamento tornam-se mais importantes. Como conclusão espera-se que a resultante dos esforços de membrana em um silo real sob ação do vento não seja tão alta quanto a teoria de membrana indicaria.

O esforço axial na parede do silo alto apresenta valores de tração mais elevados na região a barlavento, enquanto que os de compressão mais elevados se desenvolvem nas laterais a  $\pm 70^\circ$  do ponto de estagnação do vento. O esforço axial para o silo curto exibe a mesma distribuição dos silos longo e intermediário, mas

com uma força resultante maior de tração superposta; novamente um reflexo da solicitação do vento na cobertura. A distribuição vertical das resultantes de esforço axial indica que o aumento na altura do silo é mais sensível à presença de anéis.

O esforço circunferencial em ambos silos médio e curto apresenta uma distribuição tal como no silo longo. Como consequência da solicitação do vento há, entretanto, os efeitos localizados que diminuem com a redução de H/D.

Os silos curtos apresentam altos esforços de tração na cobertura. A força resultante do vento que tende a levantar a cobertura produz uma compressão circunferencial que sobrepõe o efeito do vento na região superior da casca cilíndrica.

É comentado pelos autores que o comportamento elástico-linear de silos vazios sob a pressão do vento resulta em uma combinação complicada de esforços de casca e dos elementos de enrijecimento, e não é considerada nem a perda de estabilidade (local ou global) nem a falha do material na análise via MEF. Neste âmbito, as **conclusões** a que se chega no artigo são:

- Os deslocamentos na direção do vento à altura da cobertura não é significativo nos três silos analisados.
- O sistema de colunas é o mecanismo que resiste ao momento de tombamento do silo longo. No silo curto, a contribuição da casca cilíndrica é da mesma importância que aquela das colunas.
- Os anéis no silo longo desenvolvem momentos circunferenciais para resistirem as relativamente grandes exigências à flexão sobre uma região de certa rigidez. Conseqüentemente, ocorrem perturbações próximas aos anéis, que são muito diferentes daquelas exibidas sob pressão uniforme. A pressão não uniforme produz um grande aumento local dos esforços circunferenciais e resulta da ação composta entre a parede do cilindro e o anel enrijecedor. Para se evitarem grandes concentrações de tensões circunferenciais, os anéis não devem ser muito rígidos. No silo curto, as forças desenvolvidas nos anéis são bem menores.
- No silo de grande diâmetro (curto), as forças resultantes de sustentação da cobertura resultam no desenvolvimento de grandes tensões circunferenciais de compressão na parte superior da parede do cilindro. Também se desenvolvem grandes esforços de cisalhamento radiais no topo das colunas no silo de grande diâmetro, como uma consequência das forças resultantes de sucção na cobertura.

- As grandes perturbações no momento no topo e na base das colunas ocorrem no silo longo, mas reduzem-se significativamente no silo curto.
- Os momentos de flexão circunferenciais na casca cilíndrica não são grandes, mas a sua contribuição nas concentrações de esforço circunferencial na casca nas proximidades dos anéis enrijecedores é relevante nos silos longos.
- Nos silos longos, a pressão não uniforme do vento na parede é de suma importância no comportamento do silo. Nos silos de aspecto curto, a força de sucção do vento na cobertura é de fundamental importância.

## **2.2. Área de Engenharia do Vento**

Na área de **engenharia do vento** estão apresentados artigos que tratam de ensaios, medições e tratamento de dados na simulação da camada limite atmosférica, para ventos considerados ciclônicos, em túnel de vento. O artigo de DALLEY & RICHARDSON (1992) é usado para o estudo da pressão estática de referência. Para a simulação da CLA e a geração de turbulência em túnel há os artigos de FANG & SILL (1995), FARELL & IYENGAR (1999) e de COOK (1983). A prioridade é o estudo do comportamento do silo isolado, e as medições de pressão na superfície do silo dadas em ACKERET (1934), FLACHSBART (1932), MACDONALD et al<sup>1</sup> (1988), PRIS (1960) e SABRANSKY & MELBOURNE (1987).

Em DALLEY & RICHARDSON (1992) é realizado um estudo dos efeitos da localização das tomadas de pressão, utilizando-se os túneis "T1" da *University of Surrey-UK*, e "BLWT1" da *University of Western Ontario(UWO) - Canada*.

O túnel "T1" é de circuito aberto com uma seção transversal de 1,37 x 1,68 m, e 8,1 m de comprimento. A camada limite laminar é gerada com o piso do túnel livre, e o turbulento é conseguido com geradores de vórtices, uma grade de 10 cm de altura e cubos de 2,5 cm espaçados entre si a uma densidade de ar de 15%.

O túnel "BLWT1" é de circuito aberto, seção de trabalho de 2,4 x 2,1 m com 23 m de comprimento, os dispositivos usados são geradores de vórtices de 1,5 m de altura, e o piso é forrado com cubos de 2,5 cm distribuídos a espaços de 2,5 cm.

Com relação às flutuações ou oscilações na pressão estática, que podem depender da forma da tomada, das suas dimensões, da posição do orifício etc., os autores afirmam que essas flutuações não podem ser removidas pelo aumento no tempo de amostragem (que é, em geral, de até 60 s). Pelo exame dos dados do "BLWT1" a faixa de flutuação é de 0,7% dos coeficientes de pressão da parte da edificação a barlavento, o que não é um erro considerável às medições no modelo.

Em suma, as principais conclusões são: i) na porção de escoamento livre ao longo do eixo longitudinal de qualquer túnel de vento de camada limite haverá um gradiente de pressão estática, a menos que o túnel tenha sido projetado para se evitar isso; ii) na direção horizontal da seção transversal do túnel não há variações significativas nas medições de pressão estática, a menos que haja irregularidades na estrutura do túnel; iii) ao longo da altura da seção transversal a pressão estática apresenta-se constante no caso de escoamento laminar, exceto para a vizinhança da parede onde a pressão estática cai rapidamente; iv) a melhor referência é em relação à tomada de pressão no piso da mesa giratória sem o modelo.

Em FANG & SILL(1995) é realizada uma pesquisa sobre a influência da disposição de elementos de rugosidade no piso de um túnel de vento. Tradicionalmente, os elementos de rugosidade são dispostos uniformemente e não refletem o caráter aleatório dos ambientes naturais. É citado que, nos ambientes naturais, o comprimento aerodinâmico de rugosidade,  $z_0$ , depende essencialmente da altura média dos obstáculos. Mas, quando se cria a rugosidade com elementos dispostos no piso do túnel, o  $z_0$  depende principalmente da altura.

As camadas limites medidas são em número de 19, uma para cada campo de elementos de rugosidade. A escala de simulação determinada para o vento é de 1:50, com  $z_0$  entre 21 a 46 cm em escala real, a intensidade de turbulência  $I$  entre 29 a 37%, e o comprimento longitudinal dos turbilhões do vento,  $L_1$ , entre 16 a 28 cm.

A conclusão é que a distribuição de rugosidade não tem nenhum efeito sobre a intensidade de turbulência e sobre a escala de comprimento, porque não há um bom nível de correlação. Do ponto de vista do número de Jensen,  $D/z_0$ , onde  $D$  é uma dimensão significativa da edificação, qualquer uma das simulações das distribuições de rugosidade pode ser satisfatória para ensaios típicos em túnel de vento.

No artigo de FARELL & IYENGAR (1999) é tratada a simulação de camadas limites atmosféricas utilizando-se geradores de turbulência no começo do túnel e elementos de rugosidade no piso de túnel de vento. São feitas comparações com dados da camada limite atmosférica real e de outras simulações da literatura em túnel de vento. O método proposto só apresenta bons resultados para camadas limites laminares. Para camadas limites turbulentas, são obtidos valores imprecisos de  $z_0$ , porque mais de um conjunto de valores pode atender ao mesmo perfil de velocidades. A conclusão é que a adição de geradores de turbulência a barlavento dos modelos melhora a simulação das flutuações de pressões.

Em COOK (1983) há uma técnica para geração de turbulência em túneis de vento curtos, com o emprego de dispositivos na entrada e ao longo do túnel até a câmara de ensaios. São definidas as condições e os parâmetros para a escolha dos dispositivos, e também são descritas as influências de cada dispositivo na turbulência e nas características do conjunto de camadas limites que podem ser geradas.

Em ACKERET (1934) é ensaiado um modelo cilíndrico de relação  $H/D = 1,13$  com nervuras horizontais e verticais externas, submetido a um escoamento turbulento com um número de Reynolds igual a  $1,2 \times 10^6$ . Contudo, não há uma descrição das características da turbulência gerada no túnel.

Em FLACHSBART (1932) foi ensaiado um modelo cilíndrico de relação  $H/D=1,73$  com nervuras horizontais e verticais externas, para dois números de Reynolds,  $4,2 \times 10^5$  e  $7,2 \times 10^5$ , mas sem uma descrição das condições de velocidade e de turbulência. A conclusão é que não há influência das nervuras horizontais sobre as pressões, e que é pequena a diferença entre as pressões medidas por uma tomada de pressão próxima a uma nervura e uma outra tomada entre duas nervuras.

Em MACDONALD, KWOK & HOLMES<sup>1</sup>(1990) são realizadas medições em túnel de vento de pressões em modelos de silos cilíndricos com cobertura cônica para  $Re > 2 \times 10^5$ . São ensaiados modelos de silos de razões  $H/D=0,5$ ,  $1,0$  e  $2,0$ , em túnel de circuito fechado com câmara de  $2,13 \times 1,52$  m por  $2,25$  m de comprimento,

para um máximo de  $U = 35$  m/s, simulando um terreno aberto. A turbulência da camada limite atmosférica é obtida com obeliscos de frente triangular (0,9 m de altura e 0,12 m de base), as medições são feitas com anemômetro de fio quente, os modelos são em acrílico com  $D=200$  mm,  $t=5$  mm e  $H=100, 200, 400$  mm, e a cobertura cônica com  $\alpha=25^\circ$ . O maior modelo provoca bloqueio da seção igual a 2,5%, não sendo aplicada nenhuma correção às pressões. As pressões são medidas com tomadas de pressão conectadas a uma válvula automática, chamada "scanivalve", com tubos para atenuar picos de frequência, e a velocidade de referência é relativa ao topo do modelo. O limite inferior para que o experimento apresente as pressões independentes do número Reynolds é  $Re \approx 1 \times 10^5$ .

É observado que o máximo valor do coeficiente de pressão negativa aumenta à medida que a relação  $H/D$  aumenta; o coeficiente aumenta de 1,0 ( $H/D=0,5$ ) para 1,8 ( $H/D=2,0$ ). O descolamento total do escoamento no modelo ocorre a  $\sim 130^\circ$  da linha de estagnação, depois do que as pressões permanecem praticamente constantes.

Nas conclusões são mostrados que: i) as máximas magnitudes de pressões médias ocorrem a 60-90% da altura do cilindro do modelo e abaixo de 50% essa magnitude diminui consideravelmente; ii) as distribuições de pressões médias mostram sucções elevadas que ocorrem próximo à porção a sotavento e ao ápice da cobertura; iii) em geral, os resultados são bons para as pressões médias no cilindro e na cobertura quando comparados com números de Reynolds em escala real de outros estudos. No entanto, os desvios padrões das pressões são menores nos resultados obtidos. Isto é atribuído à possibilidade de não se haver atingido o comportamento das pressões independente do número de Reynolds.

Em PRIS (1960) foram realizados estudos da influência das nervuras nas distribuições de pressões em cilindros  $H/D = 1,3$  e  $Re \cong 3,0 \times 10^5$ . Descobriu-se que a relação entre a altura da nervura e o diâmetro do cilindro,  $h_n/D$ , não tem influência sobre o coeficiente de arrasto e que, quando o número de nervuras é grande, maior que 16, a resistência é a mesma com o vento incidindo diretamente sobre ou entre nervuras. PRIS (1960) também constatou o mesmo que FLACHSBART (1934), ou seja, que as diferenças são pequenas entre as posições das tomadas de pressão mais próximas às nervuras ou no meio de duas.

Em SABRANSKY & MELBOURNE (1987) é detalhado o estudo das distribuições de pressão em modelos de silos cilíndricos de cobertura cônica a partir de ensaios em túnel de vento, comparando-se os resultados aos silos em escala real.

É mostrada a importância sobre as distribuições de pressões do vento em silos cilíndricos de cobertura cônica para estimar com precisão os coeficientes de arrasto e de sustentação da cobertura. Há um relato de acidentes de amassamento do cilindro do silo metálico a barlavento e de tombamento do silo, sendo raros os acidentes nas coberturas cônicas, embora estas sejam leves e delgadas.

Os ensaios foram realizados na *Monash University* (Austrália) em um túnel de vento de camada limite e circuito fechado com seção de 2,0 x 2,0 e 15,0 m de comprimento. Foram usados geradores de turbulência triangulares no início da seção e elementos de rugosidade no piso do túnel. A velocidade do vento na cobertura é 10 m/s, cujo perfil em função da altura do túnel é equacionado com uma lei potencial de expoente igual a 0,13. A intensidade de turbulência à altura do topo do cilindro (modelos 1, 2 e 3 - de  $D = 150$  mm e  $H = 175$  mm, e modelos 4 e 5 -  $D = 149$  mm e  $H = 225$  mm) é em torno de 15%.

A escala geométrica dos modelos é escolhida para serem atingidos números de Reynolds maiores, porque em DAVENPORT et al. (1974) mostra-se que escala geométrica de valor igual ao dobro da escala longitudinal do vento não modifica significativamente a distribuição de pressões. A simetria do modelo e a geometria sem cantos vivos não afetam as distribuições de pressões, mesmo para a escala do modelo sendo quase três vezes a escala longitudinal do vento. O modelo é colocado em uma mesa giratória no piso do túnel e é girado de  $22,5^\circ$  em  $22,5^\circ$ . Não há correção de bloqueio para os coeficientes de pressões, porque o maior modelo ocupa 1% da seção do túnel. Os  $Re$  para os ensaios estão entre  $1 \times 10^5$  e  $3 \times 10^5$ .

Os resultados das distribuições de pressão média e valores localizados de desvio padrão, pressões mínima e máxima nas coberturas são dadas para os modelos 1, 2, 3 com  $H/D = 1,16$  e inclinações  $\alpha$  das coberturas iguais a  $15^\circ$ ,  $27^\circ$  e  $45^\circ$ . De modo semelhante, são apresentados resultados para os modelos de  $H/D = 0,78$  e  $0,66$  e inclinação da cobertura cônica de  $27^\circ$ . As comparações dos valores obtidos nos modelos reduzidos com os resultados em escala real de COOK & REDFEARN (1980) mostram boa concordância, tanto em magnitude quanto em distribuição, nas



regiões próximas à linha de estagnação, para os coeficientes médios de pressão negativa, e nas regiões de pressões próximas de zero. No entanto, as magnitudes dos coeficientes médios de pressão negativa na região de 40° a 150° a partir da direção de incidência do vento são 20% maiores para os modelos. O coeficiente de arrasto é 0,37 para o modelo, 17,78% menor que o de 0,45 para o silo em escala real.

### **2.3. Área de Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**

Considerando-se que o estudo em túnel de vento está diretamente relacionado à redução de escalas para o modelo atmosférico do vento e para o modelo da estrutura do silo, desenvolveu-se uma pesquisa em **análise dimensional e teoria da semelhança e de modelos físicos** para atender às condições de semelhança entre o protótipo e o modelo reduzido.

Os artigos de FANG & SILL (1992) e WANG et al. (1996) apresentam relações de semelhança entre os parâmetros aerodinâmicos à simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento.

No estudo das características gerais do vento na engenharia a literatura consultada contém livros com conceitos e procedimentos fundamentais, BLESSMANN (1995), SIMIU & SCANLAN (1986), LAWSON (1980). A literatura para a análise dimensional, teoria da semelhança e de modelos físicos é CARNEIRO(1996). E, para a análise experimental, são usados o manual para ensaios em túnel de vento do ASCE (1997) e o manual de ensaios de KOBAYASHI(1993). Na análise estatística dos ensaios em túnel de vento, em que os dados coletados são de natureza aleatória, é utilizado o livro de BENDAT & PIERSOL (1971).

Em FANG & SILL (1992) é examinada a relação entre o comprimento de rugosidade aerodinâmico,  $z_0$ , e o tamanho, forma e espaçamento dos elementos de rugosidade em ambas condições natural e controlada. Nas condições naturais, o parâmetro que mais influencia é a altura característica  $h_k$  dos obstáculos na

vizinhança do protótipo. O valor de  $z_0$  em escala real é dado pelo produto de  $h_k$  por  $c$ , adotando-se  $c \approx 0,1$ . Para as condições controladas, isto é, ensaios em túnel de vento, o artigo contém gráficos de  $z_0$  vs.  $h_k$  em que se controlam o tamanho, a forma e a altura dos elementos, mostrando-se que a correlação entre esses dados é pequena.

Foi executada uma série de 19 ensaios no túnel de vento da *Clemson University*, sendo 18 com arranjos aleatórios e 1 com arranjo uniforme de elementos de rugosidade. Com base nestes ensaios conclui-se que, por exemplo, se é adotada uma escala geométrica de 1:50, os valores de  $h_k$  no protótipo são simplesmente 50 vezes os valores obtidos no modelo de ensaio.

As pressões são medidas na cobertura e nas paredes do modelo. Na análise são consideradas a intensidade de turbulência, a escala de comprimento integral e o  $z_0$ . Como conclusão, afirma-se que qualquer um dos 19 ensaios pode satisfazer os critérios de modelagem para uma dada categoria de rugosidade. Vale salientar que os 19 ensaios caem na mesma categoria de rugosidade.

Em WANG et al. (1996) são estudados os efeitos de escala na modelagem em túnel de vento pela comparação de resultados de modelos com várias escalas de camadas limites atmosféricas. Os efeitos de escala em um corpo rombudo são estudados para três modelos de diferentes razões de escala.

É mostrado inicialmente que o  $z_0$  tem sido combinado com a espessura da camada limite,  $\delta$ , para formar o número de Jensen  $J_e = \delta/z_0$ . O critério de semelhança é que o número de Jensen seja igual no modelo e no protótipo.

Em seguida, é admitido que há uma relação entre o comprimento de rugosidade e a altura média dos obstáculos em escala real,  $h_k$ , assumindo-se  $c \approx 0,08$ . Pela combinação dos critérios para a espessura da camada limite e a altura média dos obstáculos é obtida a razão de escalas do elemento de rugosidade, que deve ser a mesma da espessura da camada limite e não pode ser selecionada independentemente porque as alturas de rugosidade diferentes envolvem camadas limites diferentes.

É adotada a lei potencial para a modelagem do perfil de velocidade, em que para se obter a potência  $a$ , que é aplicada ao quociente de velocidades a uma cota  $z$  e a uma cota de referência  $z_r$ , os dados experimentais são traçados em papel bilogarítmico. Para superfícies rugosas, o parâmetro  $a$  depende apenas da

rugosidade. Para a modelagem correta do perfil de velocidade em túnel de vento, devem ser atingidos valores de  $a$  idênticos para o modelo e para o protótipo.

Numa comparação de perfis de velocidade para tipos diferentes de terrenos é mostrado que quanto mais rugoso o terreno, maior é o expoente  $a$ . Além disso, no túnel de vento os efeitos da altura de rugosidade no expoente  $a$  são diferentes daqueles na camada limite atmosférica (CLA). A razão é que o gradiente de velocidade no modelo é muito maior que no protótipo. É comum adotar-se na prática o fator de escalas da velocidade  $U$  igual a 1. Se o fator de escala geométrico  $I_z$  é 100, então  $I_{dU/dz}$  é 0,01, ou a velocidade gradiente no modelo é 100 vezes a do protótipo. O gradiente de velocidade e a rugosidade atuam de modo similar para a resistência ao vento; logo, um gradiente de velocidade elevado e uma rugosidade pequena no modelo podem apresentar o mesmo expoente da lei Potencial como em um gradiente de velocidade pequeno e uma rugosidade alta no protótipo. Os melhores fatores de altura de rugosidade e espessura da CLA estão entre 200 a 400 e, para o perfil de intensidade de turbulência, os fatores  $I_{z_0} = I_{h_k} = I_d$  estão entre 200 a 600.

Para a modelagem de corpos rombudos, como é o caso dos silos, é citado que é necessária a igualdade entre as distribuições de pressão no modelo e no protótipo. São adotados unitários os fatores de escala da velocidade e da densidade do ar. Caso seja adotado o critério de Euler, os números de Euler ( $E_u = p/\rho U^2$ ) devem ser iguais no modelo e no protótipo, o que dá  $I_p = I_r I_U^2$ .

No livro de BLESSMANN(1995) é tratado o vento na engenharia estrutural, sendo expostos conceitos básicos de movimentação do ar na atmosfera terrestre, classificação dos tipos de ventos, hipóteses fundamentais, descrição e métodos de cálculo de perfis de velocidade média, intensidade, espectro e escalas de turbulência. Com base nesta referência, que é fonte das considerações da norma brasileira de vento, é definida uma considerável parte da metodologia.

O livro de SIMIU & SCANLAN (1986) é clássico no estudo dos efeitos do vento em estruturas, inclusive em se tratando das condições de semelhança derivadas a partir da análise dimensional, que são expressas em termos das variáveis que

definem as escalas de: comprimento, velocidade, densidade, frequência, gravitacional, e, por exemplo, uma condição derivada, como as condições atmosféricas (dada pelo número de Reynolds). Esta referência é utilizada para o cálculo dos dispositivos geradores de vórtices que são colocados no início do túnel.

O livro de CARNEIRO (1996) é o que traz compilada toda a teoria de análise dimensional, com aspectos históricos e clássicos, contendo exemplos de problemas que vão desde a estática e dinâmica dos corpos sólidos deformáveis, interação entre fluido e corpos rígidos, mecânica dos solos, condução de calor, eletromagnetismo, até condições de semelhança em biologia. Há ainda um tratado sobre semelhança física, envolvendo semelhança incompleta, efeito de escala, modelos distorcidos, método de Huntley para distorção de semelhança e condições de semelhança física na interação entre fluido e estruturas fixas flexíveis (com exemplos de modelos de estruturas "offshore"). É a literatura básica da qual extrai-se praticamente toda a teoria de análise dimensional, de semelhança e de modelos físicos.

A publicação do ASCE(1997) contém um capítulo específico sobre a modelagem do vento em túnel de vento, em que se expõem as condições de escolha das escalas, e efeitos como o do número de Reynolds.

A escala geométrica deve ser escolhida com base no número de Jensen  $J_e = \delta/z_0$  (comprimento de rugosidade,  $z_0$ , combinado com a espessura da camada limite,  $\delta$ ), e na escala da turbulência. A escala de velocidade é escolhida de acordo com os tipos de ensaios possíveis em túnel de vento.

Supondo a simulação das características de rigidez e de massa da estrutura, como é o caso proposto para o modelo de silo, o problema é classificado como aeroelástico. É necessário, portanto, estabelecer uma semelhança entre a massa e a rigidez da estrutura em escala real e o modelo. O tipo de modelo chamado réplica é adequado para representar as propriedades elásticas de estruturas que tenham essas propriedades concentradas na geometria exterior, como são as estruturas em casca dos silos. Vale observar que os silos contêm estruturas não influenciadas pela ação da gravidade como é o caso das estruturas suspensas e, portanto, o número adimensional de Froude não se faz necessário.

Em KOBAYASHI (1993), o capítulo desenvolvido por Donald F. Young mostra as técnicas empregadas à obtenção dos números adimensionais para as condições de semelhança e escalas. Há uma descrição dos postulados básicos da análise dimensional, e exemplos para ilustrar a aplicação do teorema fundamental da análise dimensional ou teorema de Vaschy-Buckingham, ou teorema dos números Pi.

O livro de BENDAT & PIERSOL (1971) dá o tratamento estatístico necessário ao estudo das características do vento em túnel. Com relação à análise dimensional, traz de interessante quais são as variáveis envolvidas no tratamento da turbulência, sendo útil na escolha das variáveis para a análise dimensional.

## **2.4. Comentários sobre a revisão bibliográfica**

A revisão está dividida em três áreas para uma análise criteriosa do problema da ação do vento sobre os silos. Os comentários seguem a mesma lógica, sendo formada, ao final, uma interpretação do conjunto das áreas como um todo.

Na **área de mecânica das estruturas** há material que se aplica aos ensaios em túnel de vento, bem como para a comparação e a interpretação dos resultados.

Neste ponto, os artigos de BRIASSOULIS<sup>1,2</sup> (1986, 1988) servem como auxiliares, porque neles são fornecidos resultados via método dos elementos finitos, acerca do comportamento da estrutura para uma determinada distribuição de pressão não uniforme do vento.

Na área de **engenharia do vento** a literatura é suficiente para a simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento, admitindo-se um vento de características ciclônicas, que é o tipo considerado atualmente nas normas de vento (BLESSMANN 1995). As limitações são oriundas da complexidade do fenômeno do escoamento de ar na superfície terrestre, que se reflete diretamente na sua simulação em túnel de vento. A partir dos ensaios dos modelos reduzidos em túnel de vento é possível comparar os resultados obtidos com a literatura, contudo apenas no que se refere às pressões na superfície dos modelos e aos parâmetros aerodinâmicos, pois

não há medidas de deslocamentos nem descrições do comportamento da estrutura do modelo com colunas externas.

A área de **análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos** contém material bem estruturado, que permite relacionar as variáveis e obter os números adimensionais para os protótipos e modelos.

Os modelos que podem ser construídos são aeroelásticos do tipo réplica simplificados, para o estudo das distribuições de ondas de deformação a barlavento do corpo cilíndrico, e os modelos aerodinâmicos rígidos, para as medições das pressões e dos coeficientes a elas associados.

Como um todo, as áreas pesquisadas proporcionam fundamentos e condições para o desenvolvimento da hipótese que um silo cilíndrico metálico não pode ser analisado como um silo de paredes rígidas, ressaltando-se que os únicos tipos de experimento encontrados na literatura que empregam modelos cilíndricos flexíveis são relatados nos artigos de RESINGER & GREINER (1981) e de UEMATSU & UCHIYAMA (1985), em que foram utilizados modelos reduzidos construídos em finíssimas chapas de alumínio e de poliéster, respectivamente, mas que não foi considerada a aposição de elementos externos ao corpo cilíndrico.

## 3. METODOLOGIA

---

---

Este t3pico cont3m as descri33es dos materiais empregados para a gera33o do escoamento de ar no t3nel de vento e 3 confec33o dos modelos, bem como dos m3todos utilizados na determina33o dos par3metros de similaridade, e nas medi33es das press3es e deslocamentos dos modelos.

### 3.1. *Materiais*

Os materiais que s3o empregados para a constru33o dos dispositivos de gera33o de turbul3ncia no escoamento de ar s3o madeira, papel3o, PVC e a3o.

Os dispositivos usados para obter os perfis s3o barreira alta, em madeira, grade em barras de a3o arredondadas e horizontais, geradores de v3rtices em madeira e, para a rugosidade do piso do t3nel, uma prancha com copos em PVC, duas pranchas com caixas de ovos em papel3o, uma prancha com pe3as formadas por tr3s blocos pl3sticos do tipo Lego©, e metade de uma prancha com pe3as de um bloco.

A fun33o da barreira 3 prover um d3ficit inicial de momento representando o efeito de um campo de rugosidade mais longo, e dos geradores de v3rtices, chamados obeliscos, 3 distribuir este momento pela camada limite em desenvolvimento e influenciam na turbul3ncia m3dia e a grade 3 usada para gerar turbul3ncia m3dia. Os elementos de rugosidade ao longo do campo representam a superf3cie rugosa na vizinhan3a da estrutura real, conforme o valor de  $z_0$ .

A altura da barreira 3 bem determinada pelo aumento de sua altura por incrementos para produzir uma fam3lia de camadas limites.

Para a determinação dos parâmetros e dimensões iniciais dos dispositivos, o silo em escala real é considerado em um terreno típico de fazendas com muitas árvores, cercas e algumas edificações, sendo adotado  $z_0 = 80$  mm conforme (BLESSMANN 1995). De acordo com FANG & SILL (1992) o comprimento de rugosidade é proporcional à dimensão característica  $h_k$  dos obstáculos, com  $c \cong 0,1$ :

$$z_0 = c \cdot h_k \quad (1)$$

Deste modo, considerando-se que os modelos estão a uma escala geométrica de 1:42, e os obstáculos em escala real são aproximadamente de  $h_k = 80 \cdot (1/0,1) = 800$  mm, então a altura exigida para os elementos de rugosidade dentro do túnel é em torno de  $800/42$ , sendo adotado 19 mm. Os geradores de vórtices são calculados de acordo com SIMIU & SCANLAN (1986), na seqüência i) a v):

i. Escolha da espessura da camada limite,  $\delta = 950$  mm

ii. Escolha do perfil de velocidade média pela lei potencial

- Altura de referência:  $z = 10$  m;

- $\frac{U(z)}{U(10)} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha$ ; de acordo com BLESSMANN (1995):  $\alpha = 0,105$

iii. Cálculo da altura dos geradores de vórtices (obeliscos),  $h_g$ .

- $h_g = \frac{1,39\delta}{\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)} \Rightarrow h_g = 1255$  mm

- Adotado  $h_g = 1210$  mm (devido a  $H_T = 1220$  mm  $\Rightarrow \delta = 915$  mm)

iv. A largura da base do obelisco é conforme SIMIU & SCANLAN (1985).

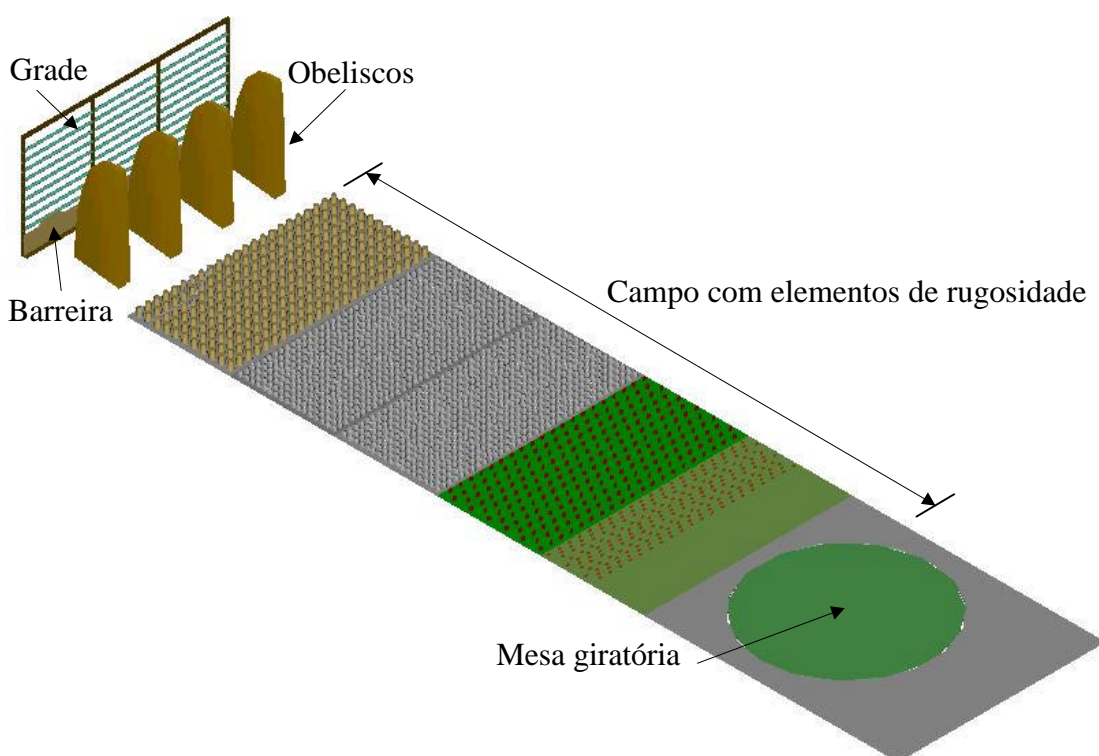
- $\frac{d}{H_T} = \frac{915}{1220} \approx 0,75$ ,  $\frac{b_g}{h_g} = 0,11 \therefore b_g = 0,11 * 1210 \cong 133$  mm. Adotado  $b_g = 130$

v. Altura da barreira,  $c_b$

- Esta altura é obtida experimentalmente e depende dos ajustes dos perfis de velocidade e de intensidade de turbulência.



A descrição dos dispositivos está na tabela 2, e a disposição final correspondente mostrada na figura 9, em que o túnel apresenta seção transversal igual a 2440 por 1220 mm e o comprimento do campo medido a partir da primeira prancha ao centro da mesa giratória é 7850 mm. Observa-se que a superfície onde são encaixadas as peças de Lego tem um padrão uniforme de rugosidade com cilindros de 5 mm de altura, que se estende até a mesa giratória.

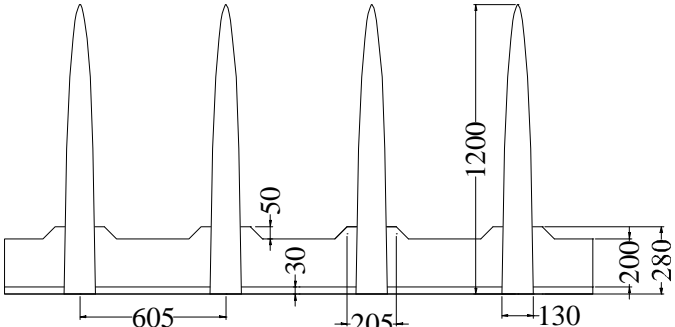
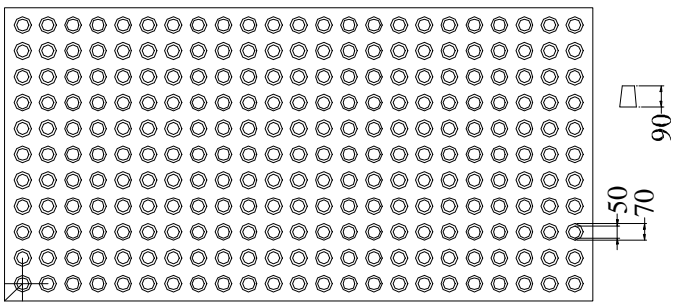
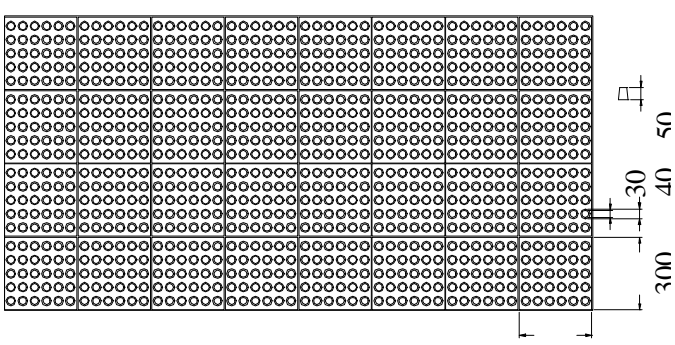
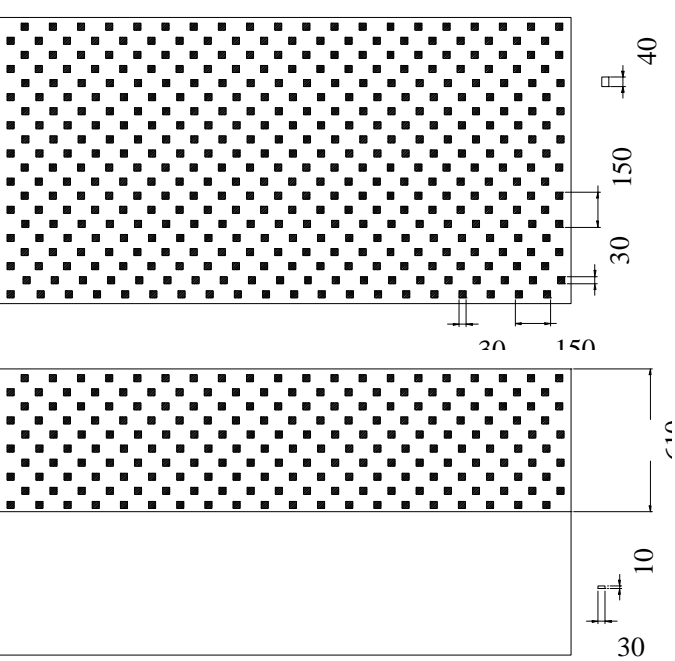


**FIGURA 9 - Disposição geral dos dispositivos no túnel**

**TABELA 2 - Descrição dos dispositivos**

Grade com barras arredondadas	
-------------------------------	--

Tabela 2 - Descrição dos dispositivos

Barreira alta e geradores de vórtices	
1 prancha com copos	
2 pranchas com caixas de ovos	
<p>1 prancha com peças de três Legos (40 mm de altura)</p> <p>1/2 prancha de 1 Lego (13 mm de altura)</p>	

Os tipos de modelos definidos são rígido e flexível e os materiais empregados para a confecção deles são madeira, papel, cobre, PVC, PETP (Polyethylene terephthalate) e poliéster. As propriedades que são importantes especificar são aquelas para a confecção do cilindro do modelo flexível. Os demais materiais são utilizados para conferir forma ao corpo cilíndrico e à cobertura cônica dos modelos rígidos e à cobertura cônica do modelo flexível.

O modelo rígido é feito com madeira e lâminas de madeira compensada, com pequenos tubos de cobre embutidos na lâmina de madeira e usados para tomadas externas de pressão, tubos em PVC para a conexão entre as tomadas e as válvulas, e entre estas e os transdutores de pressão. Os elementos externos são feitos em madeira e PETP para simular as colunas no corpo cilíndrico, e em fios roliços em cobre e de diâmetro 1,0 mm para simular as dobras radiais na cobertura cônica.

O modelo flexível é composto em poliéster na casca cilíndrica, em PETP nas colunas, madeira balsa e papel na cobertura cônica. O emprego de madeira de baixa densidade (valor relativo à massa da água igual a 0,4) e papel na cobertura é justificado pelo fato de serem simuladas apenas as características de forma geométrica e de massa. O material usado na construção da casca cilíndrica é Melinex®, um filme de poliéster de acordo com ICI Plastics Division, e para as nervuras é PETP, conforme Amari Plastics, com especificações dadas na tabela 3.

**TABELA 3 - Especificações para o material usado no Modelo 1,0**

Melinex (casca cilíndrica)	
$E = 4414,5 \text{ Mpa}$	Módulo de Elasticidade
$\sigma = 98,1 \text{ MPa}$	Tensão de escoamento
$\gamma = 1,4 \text{ g/cm}^3$	Densidade
PETP (nervuras)	
$E = 3000 \text{ Mpa}$	Módulo de Elasticidade
$\sigma = 80 \text{ MPa}$	Tensão de escoamento
$\gamma = 1,37 \text{ g/cm}^3$	Densidade

## **3.2. Métodos**

Os métodos propostos são análise dimensional e teoria da semelhança física, técnicas de ensaios em túnel de vento, medições de pressões e visualização do escoamento de ar na superfície externa de modelos rígidos e medições de deslocamentos por imagens em modelos flexíveis.

Na análise dimensional definem-se as leis para os modelos físicos reduzidos, que são fundamentadas no princípio de semelhança entre dois processos, quais sejam, a ação do vento sobre silos em escala real (protótipos) e a ação do vento gerado em túnel de vento sobre modelos reduzidos dos silos.

Para os ensaios em túnel de vento são definidos os parâmetros para a geração do escoamento de ar e as medições da velocidade e da turbulência, com o objetivo de simular a camada limite no túnel de vento, e os processos de aquisição, gravação, preparação, qualificação e análise de dados para os modelos reduzidos dos silos.

Para as medições das pressões na superfície externa dos modelos rígidos o método é descrito sucintamente, mas suficiente para o entendimento da técnica.

Para as medições dos deslocamentos do modelo flexível, que são realizadas a partir de imagens gravadas do modelo sob a ação do vento, são mostrados os parâmetros e o método de aquisição e emprego das imagens aos cálculos.

### **3.2.1. Análise Dimensional**

O estudo do comportamento estrutural de silos cilíndricos à ação do vento envolve uma grande quantidade e diversidade de informações, relacionadas às áreas de engenharia de estruturas e de engenharia do vento. A exequibilidade desta tarefa está ligada a condições e hipóteses simplificadoras que são aplicadas a ensaios físicos experimentais. Tais condições, em um escopo geral, são obtidas com a análise dimensional, a qual abrange "os casos em que não é possível formular as equações diferenciais do fenômeno" (CARNEIRO 1996).

Os estudos de estruturas à ação de vento estão praticamente consagrados aos ensaios experimentais em túneis de vento de modelos físicos reduzidos, em que se prevê o comportamento do protótipo a partir dos resultados obtidos no modelo. O objetivo é estabelecer as condições de semelhança física para o estudo de modelos reduzidos de silos cilíndricos em túnel de vento.

Para a análise dimensional dos ensaios em túnel de vento de silos cilíndricos metálicos são usados parâmetros, cuja lista constitui-se em uma *incógnita do problema* e em *variáveis independentes*. A incógnita e as variáveis independentes são dispostas em colunas de uma matriz dimensional, mas são também considerados como dados as *funções de forma* e os *fatores de forma*.

Admite-se que o deslocamento radial da parede do silo,  $d$ , é função de onze parâmetros: diâmetro do silo  $D$ , massa específica do ar  $\rho_0$ , velocidade média do escoamento  $U$ , módulo de elasticidade  $E$ , tensão característica  $S_k$ , pressão exercida pelo vento  $p$ , uma frequência característica das flutuações da velocidade do vento  $h$ , a viscosidade dinâmica do ar  $\mu_0$ , a massa total da estrutura  $M$ , momento de inércia característico da estrutura  $I$ , um intervalo de tempo característico  $T_c$ . Os parâmetros  $E$ ,  $S_k$ ,  $p$  têm as mesmas dimensões, logo escolhe-se uma delas, no caso a tensão, para caracterizar  $E$  e  $p$ . Os  $E$  e  $p$  são calculados como fatores de forma em função de  $S_k$ .

Com isto, escreve-se o deslocamento radial  $d$  em função de nove parâmetros:

$$\delta^d = D^{\alpha_1} U^{\alpha_2} \rho_0^{\alpha_3} S_k^{\alpha_4} \eta^{\alpha_5} \mu_0^{\alpha_6} M^{\alpha_7} I^{\alpha_8} T_c^{\alpha_9} \quad (2)$$

### 3.2.1.2. Leis de Semelhança Física

Para a obtenção das leis de semelhança física, são consideradas três grandezas básicas, massa  $M$ , tempo  $T$ , comprimento  $L$ , nas linhas da matriz dimensional, e a análise dos números  $\Pi$  adimensionais, obtidos dessa matriz, será feita para as grandezas determinantes ( $D$ ,  $U$ ,  $\rho_0$ ).

**Incógnita do Problema:**  $d$  = deslocamento radial da parede do silo

**TABELA 4 – Variáveis Independentes**

Dado do problema	$D$	Diâmetro do Silo
Constante física específica	$r_0$	Massa específica do ar (ou densidade absoluta)
Parâmetro	$U$	Componente longitudinal da velocidade média característica
Dado do problema	$S_k$	Tensão característica (e.g., tensão de escoamento)
Parâmetro	$h$	Frequência representativa das flutuações do vento no túnel
Constante física específica	$m_0$	Viscosidade dinâmica do ar
Dado do problema	$M$	Massa total da estrutura do silo
Dado do problema	$I$	Momento de inércia característico da estrutura do silo
Parâmetro	$T_c$	Tempo característico é o intervalo de tempo de registro suficientemente longo para que o vento gerado no túnel possa ser considerado estacionário.

Além desses parâmetros são considerados como dados do problema o coeficiente de Poisson  $n$  e a deformação específica de escoamento  $e_y$ .

**TABELA 5 – Funções de forma**

$I$	Perfil de intensidade de turbulência
$U$	Perfil de velocidade média do vento

TABELA 6 – Fatores de forma

$D/z_o$	Número de Jensen, $z_o$ é o comprimento de rugosidade
$D/L_l$	Escala de turbulência, em que $L_l$ é o comprimento da componente longitudinal da turbulência e que depende da escala temporal dada por $T_c$ , e pode ser modelada em relação à escala geométrica dos modelos reduzidos
$H/D$	Aspecto do silo, dado pela relação entre a altura $H$ e o diâmetro $D$
$d/D$	Ondulação do silo, dada pela razão entre a altura $d$ da ondulação e o diâmetro $D$
$I=s/U$	Intensidade da Turbulência, dada pela relação entre o desvio padrão $s$ das flutuações da velocidade média $U$ do vento
$h_m/h$	Relação entre uma frequência mecânica característica $h_m$ associada à estrutura do silo e a frequência $h$ representativa das flutuações do vento no túnel
$h_s/h$	Relação entre uma frequência $h_s$ associada aos vórtices gerados pela estrutura do silo e a frequência $h$ representativa das flutuações do vento no túnel
$r_s/r$	Relação entre massa específica volumétrica da estrutura e massa específica do ar
$D/z_g$	Relação entre $D$ e a altura gradiente do vento da camada limite atmosférica
$E/s_k$	Relação entre o módulo de elasticidade e a tensão característica do material
$p/s_k$	Relação entre a pressão característica do vento e a tensão característica do material

A matriz dimensional é formada pela incógnita e pelas variáveis independentes. A incógnita é posicionada na última coluna da direita e nas três primeiras colunas são colocadas as grandezas chamadas determinantes, que têm dimensões independentes entre si. As demais são chamadas grandezas diretrizes, inclusive a incógnita, que conferem a cada número  $\Pi$  a sua especificidade: um número  $\Pi$  será relacionado à massa específica, outro à viscosidade, etc.

A condição para o cálculo dos números  $\Pi$  é que o produto da matriz dimensional  $D$  e o vetor dos expoentes dos parâmetros  $\alpha_i$ , eq.(2), resulte em expoentes de dimensão nula.

São dez os parâmetros,  $n$ , e o posto  $r$  da matriz dimensional  $D$  é igual a três. Logo, de acordo com o teorema de Vaschy-Buckingham, são obtidos  $n-r = 7$  números  $P$ .

O procedimento de cálculo dos números  $\Pi$  é dado em CARNEIRO (1996) e consiste em extrair da matriz dimensional duas submatrizes: D1, dos parâmetros determinantes; D2, das grandezas diretrizes inclusive a incógnita do problema.

A partir de D1 e D2 forma-se a matriz  $S := -D\bar{I}^{-1} \cdot D2$  e compõe-se a matriz solução PI, que é formada pelos valores dos expoentes  $\alpha_i$  em  $\mathbf{P}$ , tal que cada número  $\Pi$  é dado por:

$$\Pi = D^{\alpha_1} U^{\alpha_2} \rho_0^{\alpha_3} \sigma_k^{\alpha_4} \eta^{\alpha_5} \mu_0^{\alpha_6} M^{\alpha_7} I^{\alpha_8} T_c^{\alpha_9} \delta^{\alpha_{10}} \quad (3)$$

$$D := \begin{matrix} & D & U & r_0 & s_k & m_0 & M & T_c & h & I & d \\ L & \begin{bmatrix} 1 & 1 & -3 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 \end{bmatrix} \\ M & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ T & \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -2 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$D1 = \begin{matrix} & D & U & r_0 \\ L & \begin{bmatrix} 1 & 1 & -3 \end{bmatrix} \\ M & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T & \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$D2 = \begin{matrix} & s_k & m_0 & M & T_c & h & I & d \\ L & \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 \end{bmatrix} \\ M & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ T & \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$S := -D\bar{I}^{-1} \cdot D2$$

$$D\bar{I}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -3 & -1 & 1 & -4 & -1 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

	$P_7$	$P_6$	$P_5$	$P_4$	$P_3$	$P_2$	$P_1$
$D$	0	-1	-3	-1	1	-4	-1
$U$	-2	-1	0	1	-1	0	0
$r_0$	-1	-1	-1	0	0	0	0
$s_k$	1	0	0	0	0	0	0
$m_0$	0	1	0	0	0	0	0
$M$	0	0	1	0	0	0	0
$T_c$	0	0	0	1	0	0	0
$h$	0	0	0	0	1	0	0
$I$	0	0	0	0	0	1	0
$d$	0	0	0	0	0	0	1

Da matriz solução PI e de acordo com a eq.(3) são obtidos e nomeados sete números  $\mathbf{P}$ , expostos e descritos na Tabela 7:



TABELA 7 - Números P

$\Pi_1 = \frac{\delta}{D}$	Chamado <i>P geométrico</i>
$\Pi_2 = \frac{I}{D^4}$	Chamado número <i>P de momento de inércia</i>
$\Pi_3 = \frac{D\eta}{U}$	Chamado <i>Pseudo-Strouhal</i> , porque relaciona e contém parâmetros que são dados do problema, no caso a frequência das rajadas que se superpõem a um vento de velocidade $U$ ; no número de Strouhal o que ocorre é ou a frequência ou a velocidade ser a incógnita do problema, o que não é o caso em questão.
$\Pi_4 = \frac{UT_c}{D}$	Chamado <i>Pseudo-Keulegan&amp;Carpenter</i> , pois relaciona os parâmetros $T_c$ e $U$ , que são dados do problema. ( $D$ também é dado do problema)
$\Pi_5 = \frac{M}{\rho_0 D^3}$	Chamado <i>P massivo</i> , pois fornece a relação de semelhança entre a massa da estrutura e a massa específica do ar vezes o cubo do diâmetro
$\Pi_6 = \frac{\mu_0}{\rho_0 DU}$	Classicamente, o <i>número de Reynolds</i> , $R_e$ , é igual a $r_0 DU / \mu_0$ e tem dimensões de uma relação entre as forças de viscosidade e as forças de inércia; em CARNEIRO (1996) explica-se que a força de viscosidade $F_v$ é proporcional ao produto da tensão tangencial devida ao vento pela área da superfície externa da estrutura, logo proporcional a $\mu_0 U / D$ vezes $D^2$ , que é igual a $m_0 U D$ . A força de inércia $F_i$ é proporcional ao produto de uma massa por aceleração, e uma massa de ar é proporcional a $r_0 D^3$ e uma aceleração é $U/T$ , logo $F_i$ é proporcional a $r_0 D^2 U^2$ (nota: $D/T$ pode representar uma velocidade $U$ ). A relação $F_v / F_i$ é proporcional a $\mu_0 / (\rho_0 D U)$ .
$\Pi_7 = \frac{\sigma_k}{\rho_0 U^2}$	Chamado número <i>P tensão-pressão</i> , porque relaciona a tensão característica $\sigma_k$ da estrutura à pressão média dinâmica $r_0 U^2$ da corrente livre de vento a uma certa distância do silo (fora da camada limite próxima à parede do silo). Quando em lugar da tensão $\sigma_k$ existe a pressão $p$ , chama-se número de Euler $E_u = p / r_0 U^2$ (WANG et al. 1996).

Os números  $\Pi$  são interpretados como relações de escalas das grandezas existentes no protótipo e no modelo, sendo condição de semelhança a igualdade dos  $\Pi$  em ambos modelo e protótipo. Esta condição é definida como fator de escala  $\lambda$ , que é a relação entre a magnitude de uma grandeza física no modelo e a magnitude correspondente no protótipo. Por exemplo, se o modelo é feito 10 vezes menor que o protótipo, então o fator de escala é geométrico e definido  $I_L = 1/10$ . São utilizados subscritos para definir as grandezas descritas nas Tabelas 8 e 9 junto aos fatores de escala  $\lambda$ . Além desses subscritos, são definidos **m** para indicar modelo, **p** para protótipo. Na Tabela 9 estão as condições de semelhança entre modelo e protótipo.

TABELA 8 - Fatores de escala

TABELA 9 - Condições de semelhança

FATOR	DESCRIÇÃO	CONDIÇÃO DE SEMELHANÇA	
		Número P	Condição: $\frac{\Pi_{im}}{\Pi_{ip}} = 1$
$\lambda_L = \frac{D_m}{D_p}$	Fator de escala Geométrico		
$\lambda_I = \frac{I_m}{I_p}$	Fator de escala para o Momento de inércia	$\Pi_1 = \frac{\delta}{D}$	$\frac{\lambda_\delta}{\lambda_L} = 1$ $\lambda_\delta = \lambda_L$
$\lambda_{\rho_0} = \frac{\rho_{0m}}{\rho_{0p}}$	Fator de escala para a massa específica do ar	$\Pi_2 = \frac{I}{D^4}$	$\frac{\lambda_I}{\lambda_L^4} = 1$ $\lambda_I = \lambda_L^4$
$\lambda_U = \frac{U_m}{U_p}$	Fator de escala da velocidade ou cinemático	$\Pi_3 = \frac{D\eta}{U}$	$\frac{\lambda_L \lambda_\eta}{\lambda_U} = 1$ $\lambda_\eta = \lambda_U / \lambda_L$
$\lambda_{\sigma_k} = \frac{\sigma_{km}}{\sigma_{kp}}$	Fator de escala da tensão	$\Pi_4 = \frac{UT_c}{D}$	$\frac{\lambda_U \lambda_{T_c}}{\lambda_L} = 1$ $\lambda_U = \lambda_L / \lambda_{T_c}$
$\lambda_\eta = \frac{\eta_m}{\eta_p}$	Fator de escala de frequência	$\Pi_5 = \frac{M}{\rho_0 D^3}$	$\frac{\lambda_M}{\lambda_{\rho_0} \lambda_L^3} = 1$ $\lambda_M = \lambda_{\rho_0} \lambda_L^3$
$\lambda_M = \frac{M_m}{M_p}$	Fator de escala de Massa	$\Pi_6 = \frac{\mu_0}{\rho_0 DU}$	$\frac{\lambda_{\mu_0}}{\lambda_{\rho_0} \lambda_L \lambda_U} = 1$ $\lambda_L = \frac{\lambda_{\mu_0}}{\lambda_{\rho_0} \lambda_U}$
$\lambda_\mu = \frac{\mu_{0m}}{\mu_{0p}}$	Fator de escala para a viscosidade dinâmica do ar	$\Pi_7 = \frac{\sigma_k}{\rho_0 U^2}$	$\frac{\lambda_{\sigma_k}}{\lambda_{\rho_0} \lambda_U^2} = 1$ $\lambda_{\sigma_k} = \lambda_{\rho_0} \lambda_U^2$
$I_{T_c} = \frac{T_{cm}}{T_{cp}}$	Fator de escala de tempo	OBS.: O fator de escala serve às grandezas relacionadas pelos fatores de forma	

Com as relações condicionais da tabela 9 pode-se prever para o protótipo cada resultado obtido no modelo. Por exemplo, pela condição de semelhança derivada de  $\Pi_1$ , os deslocamentos obtidos no modelo são calculados para o protótipo pela relação  $I_d = I_L$ . Analogamente, calculam-se para o protótipo os outros resultados dos parâmetros obtidos com o modelo. Observe-se ainda que o ar é o mesmo para o protótipo e o modelo e, conseqüentemente,  $\lambda_{\mu_0} = 1$ ,  $\lambda_{\rho_0} = 1$ .

Esta análise estende-se aos fatores de forma definidos na tabela 6 que complementa as condições de semelhança. WANG et ali (1996) sugerem as eq.(4), eq.(5) e eq.(6) para a simulação da camada limite em túnel de vento que indicam condições de semelhança para os fatores de escala do perfil de velocidade, do comprimento de rugosidade e do gradiente de velocidade.

A condição para o fator de escala do perfil de velocidade, para uma lei potencial, é que o fator de escala da potência  $\lambda_\alpha$  deve ser igual à unidade. Isto significa que o valor da potência  $\alpha$  deve ser igual no modelo e no protótipo.

Condição para o Fator de escala da Potência:

$$I_a = 1 \quad (4)$$

O fator de escala de rugosidade  $I_{z_o}$  deve ser igual ao fator de escala da altura gradiente da camada limite, ou seja,  $I_{z_o} = I_{z_g}$ , porque se  $I_{z_o}$  for escolhido diferente de  $I_{z_g}$  ocorrem camadas limites de espessura diferentes.

Condição para o Fator de escala de Rugosidade:

$$I_{z_o} = I_{z_g} \quad (5)$$

O fator de escala do gradiente da velocidade média,  $I_{du/dz}$ , derivado da eq.(6), é dado pela eq.(7):

$$\frac{U}{U_{z_g}} = \left( \frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (6)$$

Condição Fator de escala do Gradiente de Velocidade:

$$\lambda_{\frac{du}{dz}} = \lambda_U \lambda_\alpha \lambda_z^{-1} = \frac{\lambda_U}{\lambda_{z_g}} \quad (7)$$

É interessante o modo como o ASCE (1997) trata as condições de similaridade para as modelagens da massa e da rigidez no modelo:

**Modelagem da massa.** *Condição:* que as forças de inércia da estrutura e aquelas do escoamento sejam proporcionais (similares).

$$\text{Similaridade entre as densidades} \quad \left( \frac{\rho_s}{\rho_0} \right)_m = \left( \frac{\rho_s}{\rho_0} \right)_p \quad (8)$$

- $\rho_s$  : massa estrutural volumétrica (massa da estrutura dividida pelo volume total que ela ocupa)
- $\rho_0$  : massa específica do ar (1,225 kg/m<sup>3</sup>)

**Modelagem de Rigidez.** *Suposições:* 1) A resistência à deformação é predominantemente no regime elástico-linear; 2) A rigidez da estrutura é essencialmente independente da gravidade ou do peso-próprio. *Condição:* a resistência à deformação da estrutura deve ser proporcional às forças de inércia:

$$\left( \frac{E_{ef}}{\rho_0 U^2} \right) = \text{constante} \quad (9)$$

$E_{ef}$  : módulo de elasticidade efetivo da estrutura =  $\frac{EI}{L^4}$ ,  $\frac{EA}{L^2}$ ,  $\frac{Et}{L}$  dependendo da predominância de tensões de flexão, axial e de membrana, respectivamente.

$t$  : espessura da parede da casca       $U$  : velocidade média característica do vento

$E$  : Módulo de Young       $A$  : área da seção transversal

$\rho_0$  : massa específica do ar       $I$  : momento de inércia

### 3.2.2. Simulação em túnel de vento

O problema de se simular a interação entre o escoamento gerado dentro de um túnel de vento e um modelo depende da redução adequada das características do vento natural que atua sobre a estrutura real. Para propósitos da engenharia estrutural, é suficiente modelar aquele escoamento às condições, admitidas localmente estacionárias, da CLA (ASCE 1997). Em outras palavras, é o que mostra BLESSMANN (1995), ao mencionar que "o gradiente térmico vertical pode ser considerado adiabático. As flutuações (do vento) são quase que exclusivamente causadas por agitações mecânicas do ar (dependente da rugosidade)". Dentro do túnel, a turbulência é gerada com uma superfície rugosa e gradiente de pressão nulo.

A descrição das situações possíveis da CLA é restrita às condições de não uniformidade, mas desde que até 150 m de altura as quantidades de movimento, de calor e de massa são essencialmente constantes de acordo com a literatura, logo a modelagem física é factível e pode ser atingida com acurácia de 10% ou menos.

Com o objetivo de simular o vento no túnel são escolhidos como parâmetros a velocidade média longitudinal  $U$ ; as flutuações desta velocidade, dada pela intensidade de turbulência  $I_N$ ; um tempo característico  $T_c$ , necessário para definir a velocidade de tal modo que os vórtices ou turbilhões, originados destas flutuações, forneçam rajadas de "dimensões suficientes para envolver completamente o modelo" (BLESSMANN 1995); e  $z_0$ , conhecido como comprimento de rugosidade.

Os requisitos para serem obtidas as condições de modelagem do silo sob a ação de um vento forte, próximo às condições neutras, são a simulação dos perfis de velocidade média, de intensidade de turbulência e as macroescalas de comprimento e de tempo da turbulência. Estes perfis e as macroescalas são medidos do escoamento gerado no túnel e são comparados àqueles da NBR 6123 (1990) e ESDU (1995).

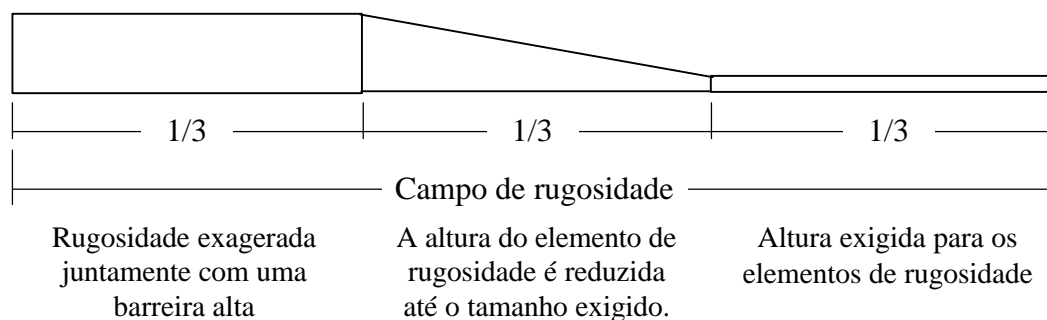
As medidas das velocidades do escoamento de ar são feitas com anemômetro de fio quente, porque é um instrumento preciso e muito empregado em ensaios dentro de túnel de vento. Vide FREYMUTH (1977) sobre anemometria a fio quente.

A técnica empregada para a geração da turbulência advém da necessidade de gerar uma camada limite turbulenta em um túnel de vento relativamente curto. A

questão é que o túnel não é longo o bastante para desenvolver as camadas limites com profundidade suficiente e o crescimento delas deve ser acelerado artificialmente.

No caso ideal, em que sejam utilizados apenas elementos de rugosidade, é necessário um campo comprido com os elementos de rugosidade da mesma altura para gerar a mesma camada limite, sem qualquer dispositivo superposto (e.g. grade).

Com o propósito de maximizar o fator de escala, é sugerido por COOK (1982) usar uma rugosidade exageradamente grande (digamos, 10 vezes a necessária) sobre o terço superior do campo de rugosidade, reduzindo-se esta rugosidade linearmente sobre o terço intermediário até a altura correta e manter tal altura sobre o terço final do campo, como ilustrado na figura 10.



**FIGURA 10 – Uma regra para a maximização do fator de escala (COOK 1982)**

No final do campo de rugosidade, a camada limite é ajustada para a rugosidade adequada de modo a se obter uma simulação do terreno desejado. A acurácia pode ser aumentada pela redução da altura exagerada dos elementos e a proporção que eles ocupam no campo.

O principal critério para a aceitabilidade da simulação é a verificação do perfil de velocidade e da escala de turbulência. Entrementes, as regiões de separação são fortemente influenciadas pela turbulência, logo também é importante a medição da intensidade de turbulência (COOK 1982).

Os dispositivos são usados no túnel para simular uma situação, em que são medidas as velocidades do vento e as suas flutuações e, a partir delas, são traçados:

- Perfis normalizados de velocidade média do vento.
- Perfis de intensidade de turbulência local e normalizada.
- Escalas temporal e espacial da turbulência.

A metodologia está de acordo com BLESSMANN (1995) e BENDAT & PIERSOL (1971), e está esclarecida à medida que os parâmetros são mostrados.

Esses perfis são traçados com as respectivas curvas teóricas, dadas por:

$$\frac{U(z)}{U(z_{ref})} = \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (10)$$

A intensidade de turbulência é definida como o quociente entre o desvio padrão das flutuações e uma velocidade de referência. Trata-se de uma medida adimensional da energia cinética contida nas flutuações do vento. Se a velocidade de referência for a do ponto onde foi calculado o desvio padrão, então a intensidade é local ( $I_{loc}$ ), dada pela eq. (11). Se a velocidade de referência foi definida com um valor fixo, então a intensidade da turbulência é normalizada ( $I_N$ ), eq. (12).

$$I_{loc} = \frac{s}{U_{loc}} \quad (11)$$

$$I_N = \frac{s}{U_{ref}} \quad (12)$$

Onde  $U$  é velocidade média. A  $U_{loc}$  é a velocidade média em cada ponto,  $U_{ref}$  é a velocidade de referência, tomada a 10 m de altura em escala real.

A turbulência do vento é caracterizada pelos turbilhões ou redemoinhos. Pode-se avaliar as dimensões dos maiores turbilhões a partir das funções de autocorrelação, com o que se definem as escalas *temporal* e *espacial* da turbulência.

As escalas da turbulência são definidas a partir das funções de correlação *temporal* e *espacial*. A correlação *temporal* serve ao estudo da repetição das rajadas do vento, e a correlação *espacial* para a caracterização da não uniformidade das rajadas sobre as estruturas, que são feitas para uma série de valores das flutuações da velocidade do vento. Esses valores são correlacionados entre si, ou seja, é feita uma autocorrelação, que descreve a dependência de um valor medido no tempo  $t$  com outro valor medido no tempo  $t+\tau$ , para um mesmo ponto. Fisicamente, isto representa

a “memória” do fenômeno das rajadas. Se a curva de autocorrelação for alargada, então a memória é grande; se a curva for estreita, então a memória é curta.

Para avaliar a escala temporal, a partir das curvas de autocorrelação normalizada,  $\rho(\tau)$ , calcula-se o *tempo característico*,  $T_c$ , do processo aleatório do vento. Isto significa uma medida do intervalo de tempo que indica a dependência entre os valores médios das flutuações da velocidade do vento. O tempo característico  $T_c$  é numericamente igual à área sob a curva de autocorrelação longitudinal normalizada, dada na eq. (13).

$$T_c(z) = \int_0^{\infty} r_1(z;t) dt \quad (13)$$

A escala espacial é obtida a partir da escala temporal, considerando-se a hipótese de Taylor, em que os redemoinhos deslocam-se com a velocidade média do vento. Portanto, a escala espacial da turbulência, a uma certa altura  $z$ , é dada pelo comprimento médio dos maiores turbilhões na direção longitudinal,  $L_1$ , na eq. (14):

$$L_1(z) = U(z).T_c(z) \quad (14)$$

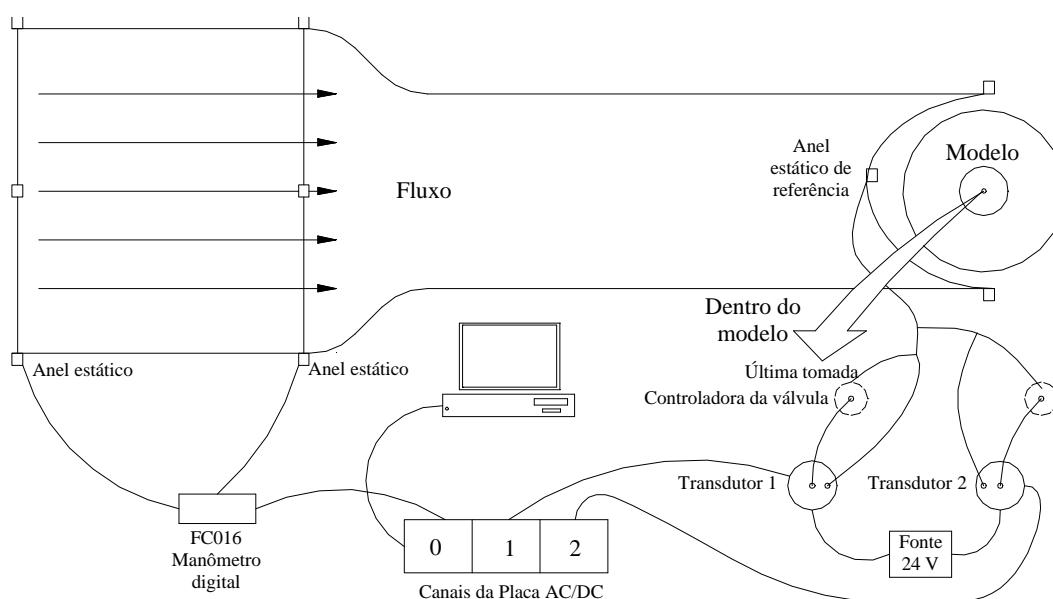
### 3.2.3. Medidas de pressões nos modelos rígidos

As medidas das pressões são obtidas da diferença entre uma pressão de referência, que é a pressão estática no escoamento livre, ou pressão estática ao longe, e a pressão estática na superfície do modelo. Esta diferença é chamada pressão efetiva externa, ou simplesmente pressão externa. Onde a pressão externa é numericamente igual à pressão ao longe é chamado ponto de estagnação. A pressão de referência é dada por um anel estático definido por três tomadas na seção de trabalho do túnel. O processo de medição é feito por meio de válvulas de busca automática das tomadas de pressão, conhecidas como "scanivalves", e a pressão em cada tomada é medida por transdutores elétricos de pressão ligados a uma placa



conversora AC/DC e armazenada no disco rígido de um microcomputador. As medidas tomadas com o manômetro digital FC016 servem para conferir a pressão em relação à velocidade do vento no túnel com as pressões medidas quando da medição do perfil de velocidade.

Na figura 11 é mostrado o arranjo do modelo, manômetros, anel estático para a tomada de pressão de referência, dos transdutores de pressão, das válvulas, das conexões das válvulas aos transdutores e deles à placa conversora AC/DC no micro.



**FIGURA 11 - Diagrama para as medidas de pressões**

Os parâmetros para o cálculo dos coeficientes de pressão externa  $C_{pe}$  são pressão estática de referência  $p_{ref}$  e pressão estática na superfície do modelo  $p_m$ .

O valor da pressão estática de referência é obtido com a tomada de pressão do anel estático de referência, ligada à válvula e daí ao transdutor, dentro do modelo.

A pressão total é obtida com as tomadas de pressão localizadas na superfície externa do modelo, ligadas à válvula e daí ao transdutor.

A velocidade média de referência é obtida a partir do perfil de velocidade medido dentro do túnel de vento, no centro da mesa giratória sem o modelo.

A equação para o cálculo dos coeficientes de pressão é:

$$C_{pe} = \frac{p_m - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho_0 U^2} \quad (15)$$

### 3.2.4. *Medições de deslocamentos por imagens*

Os deslocamentos na superfície cilíndrica do modelo flexível são medidos com o uso do Método do Reticulado, de acordo com SIROCHI & KRISHNA (1991), e a teoria dos pequenos deslocamentos como mostrada em JONES & WIKES (1989).

#### 3.2.4.1. Método do Reticulado

O método do reticulado requer linhas de referência sobre a superfície do objeto em observação. As distâncias entre as interseções das linhas são medidas antes e depois do modelo ser submetido à ação, no caso o escoamento de ar no túnel.

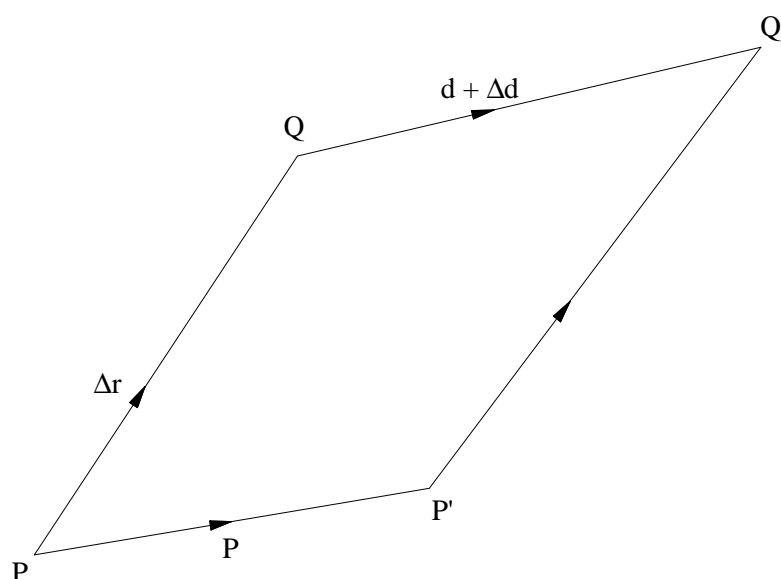
As linhas de referência aplicadas ao modelo são na forma de um reticulado contínuo em padrão ortogonal, com circunferências ao longo da altura e linhas verticais em torno do perímetro. As linhas podem ser diretamente desenhadas ou aplicadas à superfície por meio de um reticulado previamente preparado.

Os deslocamentos normais são determinados pela diferença de medida do comprimento na diagonal e nas linhas laterais. São utilizadas câmeras de alta resolução, com lentes livres de distorção, para serem medidos os deslocamentos normais e na superfície do modelo.

#### 3.2.4.2. Cálculo dos deslocamentos na superfície

Considerando-se que a casca cilíndrica do modelo sofre deflexão sob a ação aplicada, são descritas matematicamente as mudanças subseqüentes de forma e de orientação da superfície.

Na figura 12, PQ representa uma linha na superfície de um corpo. A superfície sofre uma deformação geral e a linha é agora P'Q', em que ocorre uma mudança na posição, orientação e comprimento.



**FIGURA 12 - O deslocamento geral de um elemento linear de PQ para P'Q'**

A posição de P é indicada por  $\mathbf{r}$  e a de Q por  $\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}$ . A posição de P' é dada por  $\mathbf{r} + \mathbf{d}$  e a de Q' por  $\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r} + \mathbf{d} + \Delta \mathbf{d}$ . Portanto, o deslocamento de Q é dado por:

$$\mathbf{L} = \mathbf{d} + \mathbf{Dd} \quad (16)$$

Se, para todos os pontos do corpo, o vetor de deslocamento é dado por  $\mathbf{L} = \mathbf{d}$ , i.e.,  $\Delta \mathbf{d} = 0$ , então o deslocamento representa uma translação de corpo rígido, ou seja, a posição do corpo é alterada mas a sua forma e orientação permanecem inalteradas. De outra forma, se  $\Delta \mathbf{d}$  não é nulo,  $\mathbf{L}$  representa o deslocamento como a soma de uma translação de corpo rígido e um termo descrevendo rotação ou deformação.

O termo  $\Delta \mathbf{d}$  pode ser uma expansão de Taylor como  $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) - \mathbf{d}(\mathbf{r})$

$$\Delta \mathbf{d} = \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial x_3} \Delta x_3 + \dots \quad (17)$$

em que  $x_1, x_2, x_3$  são eixos ortogonais e  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  são componentes de  $\Delta \mathbf{d}$ .

Os termos de ordem superior podem ser desconsiderados quando PQ é pequeno. As componentes de  $\mathbf{d}$  são  $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$  e as de  $\Delta \mathbf{d}$  são dadas a partir da eq.(17):

$$\Delta d_1 = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_1}{\partial x_3} \Delta x_3 \quad (18)$$

$$\Delta d_2 = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_2}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x_3} \Delta x_3 \quad (19)$$

$$\Delta d_3 = \frac{\partial d_3}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial d_3}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial d_3}{\partial x_3} \Delta x_3 \quad (20)$$

As eq.(18), (19) e (20) podem ser escritas como:

$$\Delta d_i = \sum_j \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \Delta x_j \quad i, j = 1, 2, 3$$

e simplificadas para

$$\Delta d_i = \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \Delta x_j \quad (21)$$

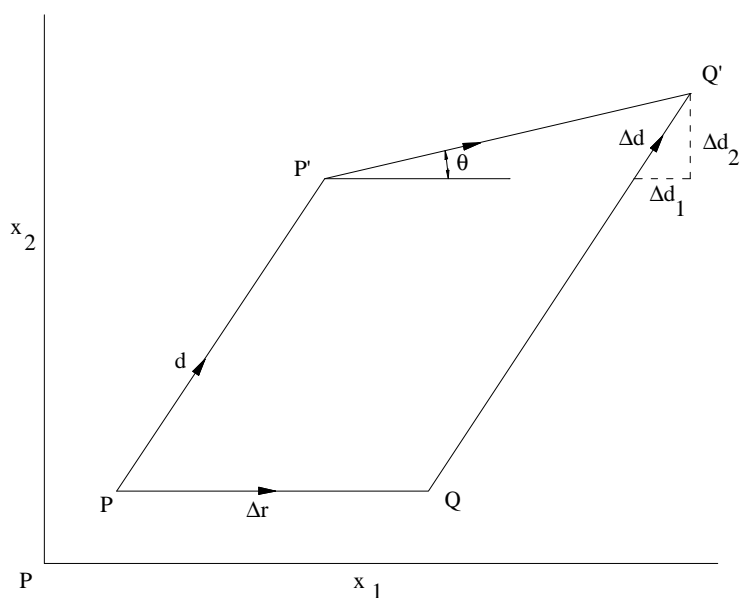
Em que a convenção de somatória de Einstein é: quando um sufixo ocorre duas vezes no mesmo termo, então efetua-se a somatória com respeito a todos os valores deste sufixo.

Os fatores  $\partial d_i / \partial x_j$  representam as componentes de um tensor de segunda ordem. Observe-se que um vetor é um tensor de primeira ordem e um escalar é um tensor de ordem zero.

O tensor pode ser escrito na forma:

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} \quad \text{onde} \quad e_{ij} \equiv \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \quad (22)$$

O uso de um tensor pode ser considerado como uma notação apropriada para representar os gradientes de deslocamento da deformação do objeto.



**FIGURA 13 - O deslocamento de PQ, paralelo ao eixo  $x_1$ , para  $P'Q'$ , inclinado  $\theta$  em relação ao eixo  $x_1$ .**

O significado físico das componentes do tensor gradiente dos deslocamentos pode ser visto mais claramente se é considerado um elemento linear em uma superfície bidimensional em que o elemento está inicialmente paralelo ao eixo  $x_1$ , como na figura 13. O vetor  $\Delta \mathbf{r}$  tem um componente apenas na direção  $x_1$ , tal que  $\Delta x_2$  e  $\Delta x_3$  são nulos. As componentes são dadas a partir das eq.(18) e (19) por:

$$\Delta d_1 = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} \Delta x_1 \quad (23)$$

$$\Delta d_2 = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} \Delta x_1 \quad (24)$$

O termo  $\frac{\partial d_1}{\partial x_1}$  representa a mudança no comprimento por unidade de comprimento ao longo da direção -  $x_1$ , e é conhecido como deformação longitudinal.

Vê-se que do mesmo modo que foi alongado, PQ foi girado de  $\theta$ :

$$\tan \theta = \frac{\Delta d_2}{\Delta x_1 + \Delta d_1} \cong \frac{\Delta d_2}{\Delta x_1} \quad (25)$$

quando  $\Delta d_1 \ll \Delta x_1$

Então, disto resulta que:

$$\lim_{\Delta x_1 \rightarrow 0} \frac{\Delta d_2}{\Delta x_1} = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} = \theta \quad (26)$$

Portanto  $\frac{\partial d_2}{\partial x_1}$  representa o ângulo pelo qual PQ sofre rotação. Similarmente,

se PQ é deformado tal que suas componentes nas direções  $x_2, x_3$ ,  $\frac{\partial d_3}{\partial x_2}$  e  $\frac{\partial d_3}{\partial x_3}$ , são os ângulos entre as componentes da linha deslocada e os eixos  $x_2$  e  $x_3$  respectivamente.

É visto deste modo como um deslocamento geral  $\mathbf{d}$  pode ser decomposto em componentes nas direções  $x_{1,2,3}$ . Os elementos na diagonal do tensor gradiente dos deslocamentos,  $\partial d_i / \partial x_i$ , representam a deformação longitudinal de cada componente, e os elementos fora da diagonal,  $\partial d_i / \partial x_j$   $i \neq j$ , indicam os ângulos entre o  $j$ -ésimo componente deslocado e os outros dois eixos.

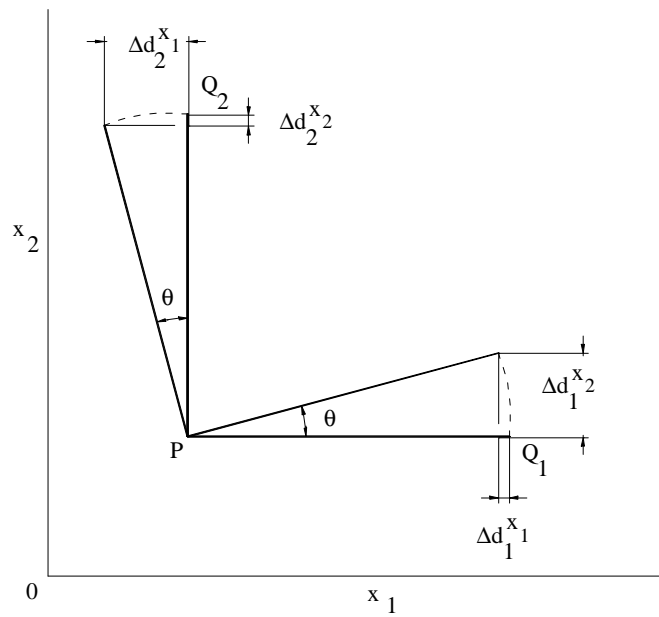
É mostrado como o tensor gradiente dos deslocamentos pode ser separado em dois, o de rotação e o de deformação. Para isto é considerado o tensor gradiente dos deslocamentos quando um corpo sofre apenas uma pequena rotação.

É admitido que  $PQ_1$  e  $PQ_2$  são dois elementos lineares de comprimentos iguais em uma superfície bidimensional, os quais são paralelos aos eixos  $x_1$  e  $x_2$ , respectivamente. Estes são girados um pequeno ângulo  $\theta$ , conforme a figura 14.

As componentes de deslocamento de  $PQ_1$  são dadas por:

$$\Delta d_1^{x_1} = \frac{\partial d_1}{\partial x_1} \Delta x_1 \quad (27)$$

$$\Delta d_2^{x_1} = \frac{\partial d_2}{\partial x_1} \Delta x_1 = \theta \Delta x_1 \quad (28)$$



**FIGURA 14 - A rotação de linhas ortogonais  $PQ_1$  e  $PQ_2$  de mesmo tamanho**

Pode-se demonstrar que para um  $\theta$  pequeno,  $\Delta d_1^{x_1} \ll \Delta d_2^{x_1}$ , logo  $\frac{\Delta d_1}{\Delta x_1} \approx 0$ .

As componentes do deslocamento de  $PQ_2$  são dadas por:

$$\Delta d_1^{x_1} = \frac{\partial d_1}{\partial x_2} \Delta x_2 = \theta \Delta x_2 \quad (29)$$

$$\Delta d_2^{x_2} = \frac{\partial d_2}{\partial x_2} \Delta x_2 \cong 0 \quad (30)$$

Vê-se a partir da figura 12 que  $\Delta d_1^{x_2} = -\Delta d_2^{x_1}$ , logo:

$$\frac{\partial d_1}{\partial x_2} = -\frac{\partial d_2}{\partial x_1} \quad (31)$$

Então, pode ser visto que, quando o corpo sofre uma pequena rotação, as componentes do tensor gradiente dos deslocamentos satisfazem a relação:

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial d_j}{\partial x_i} \quad i, j = 1, 2 \quad (32)$$

Uma relação semelhante pode ser derivada para uma superfície tridimensional

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial d_j}{\partial x_i} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (33)$$

Os gradientes de deslocamento que são dados pela eq.(22) representam ambas rotações e deformações de um corpo. Os termos desta equação podem ser escritos:

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial d_i}{\partial x_j} + \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial d_i}{\partial x_j} - \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right) \equiv \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} \quad (34)$$

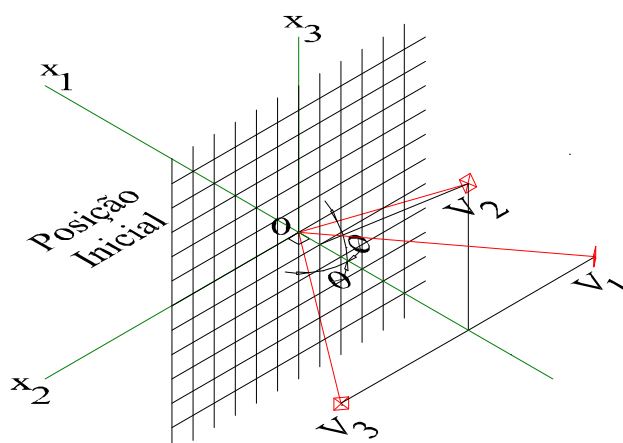
Pode ser visto que os termos  $\omega_{ij}$  satisfazem a eq.(31); se os termos  $\varepsilon_{ij}$  são nulos, então o corpo sofre apenas rotação. No caso geral, os termos  $\omega_{ij}$  representam a parte do deslocamento que constitui rotação do corpo e os termos  $\varepsilon_{ij}$  representam as deformações; os últimos são as componentes do tensor de deformação.

#### 3.2.4.3. Medições de deslocamentos por imagens no modelo flexível

Nesta seção é mostrado como as imagens são usadas para a medição dos deslocamentos no modelo flexível sob a ação do vento. A teoria cobre também a possibilidade de medições do gradiente de deslocamento, para o caso de imagens bem precisas e pontos que possam ser considerados no mesmo plano. No caso dos modelos cilíndricos em estudo são feitas medições apenas dos deslocamentos numa pequena área a meia altura do cilindro, que pode ser admitida plana.

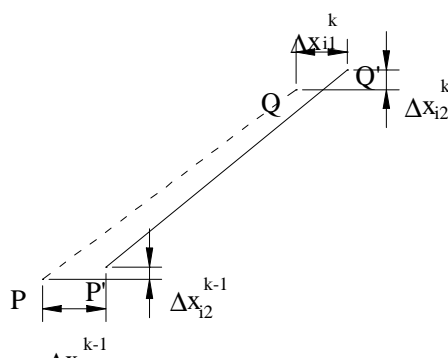
Na figura 15, as lentes das câmeras  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  nas direções  $OV_1$ ,  $OV_2$  e  $OV_3$  gravam a imagem com um reticulado na superfície do objeto. As coordenadas das lentes das câmeras são  $(X_{11}, X_{12}, 0)$ ,  $(X_{21}, 0, X_{23})$  e  $(X_{31}, X_{32}, 0)$ , respectivamente. Observe-se que  $OV_1 = OV_2 = OV_3$  e as lentes estão focalizadas no mesmo ponto.





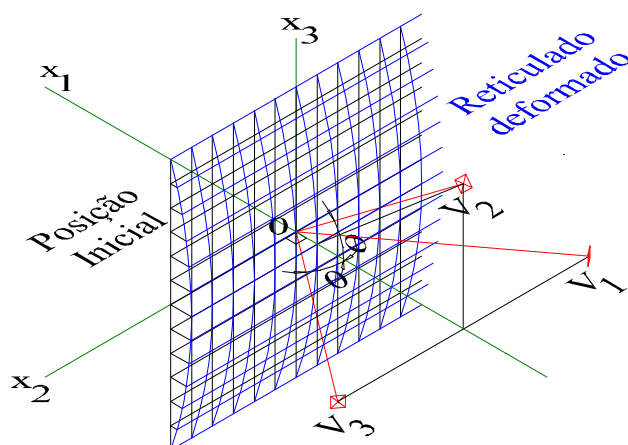
**FIGURA 15 - Posições  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  das câmeras**

É sabido que há três componentes de deslocamento  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  e nove gradientes de deslocamento, de tal modo que são necessárias doze medidas para determiná-los. Como em cada vista das câmeras podem ser medidos quatro deslocamentos, sendo dois em cada extremidade da linha, como ilustra a figura 16, então há o número necessário de medidas para o cálculo dos deslocamentos.

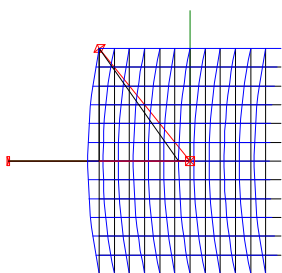


**FIGURA 16 - Deslocamentos para a vista de cada câmera**

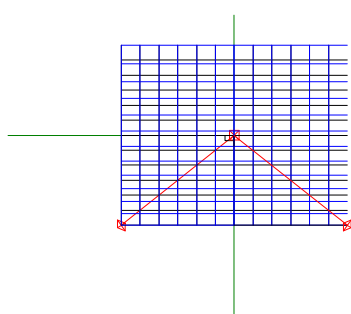
Por exemplo, quando ocorre um deslocamento na direção  $x_2$ , há um ângulo entre a linha do ponto focal ao ponto do reticulado inicial e a linha do ponto focal ao ponto deslocado do reticulado para as lentes  $V_1$  e  $V_3$  (figuras 16 e 18, respectivamente). Considerando-se que o reticulado dado pela figura 13 é deformado como mostrado na figura 17 pelas linhas em arco, as três vistas para as lentes  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  são mostradas nas figuras 18, 19 e 20, respectivamente.



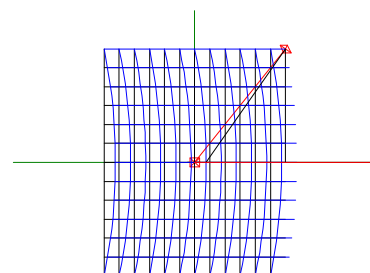
**FIGURA 17 - Reticulado deformado**



**FIGURA 18 - Vista 0V<sub>1</sub>**



**FIGURA 19 - Vista 0V<sub>2</sub>**



**FIGURA 20 - Vista 0V<sub>3</sub>**

Para a vista 0V<sub>1</sub>, em cada ponto do reticulado há deslocamentos horizontais  $\Delta x_{11}^1$ ,  $\Delta x_{11}^2$ , correspondentes aos pontos 1 e 2 (superescrito); o primeiro subscrito indica o número da vista e o segundo a direção horizontal (1) ou vertical (2).

Para a vista 0V<sub>2</sub>, os deslocamentos horizontais em cada ponto são todos nulos; isto indica que há apenas deslocamentos dos pontos nas direções  $x_1$  e  $x_3$ .

Para a vista 0V<sub>3</sub>, em cada ponto do reticulado há apenas deslocamentos horizontais  $\Delta x_{31}^1$ ,  $\Delta x_{31}^2$ ; isto indica que há deslocamento apenas na direção  $x_1$ .

Como pode ser percebido, o processo de medição dos deslocamentos e seus respectivos gradientes é uma tarefa que deve ser feita cuidadosamente. Portanto, às medições deve-se assegurar que as câmeras estejam igualmente focalizadas na mesma área que, quando se efetuando medições de deformações, deve ser plana.

## 4. PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS

---

---

O estudo dos silos cilíndricos e de cobertura cônica sob a ação do vento inicia-se com a constatação do problema de perda de estabilidade do costado e da necessidade de caracterização do comportamento do silo. Para se entender o fenômeno de perda de estabilidade, é fundamental o esclarecimento deste último aspecto que está condicionado ao ensaio de modelos reduzidos em túnel de vento.

Para tanto, o desenvolvimento dos ensaios abrange os dimensionamentos dos protótipos e dos modelos, a geração e caracterização do escoamento de ar, os ensaios dos modelos rígidos para a determinação das pressões externas atuantes, e os ensaios do modelo flexível para o estudo do comportamento da casca cilíndrica à ação do vento, que são desenvolvidos conforme as diretrizes:

- i) ESCOPO: São empregados dois modelos reduzidos rígidos e um modelo flexível para simular o comportamento aerodinâmico e aeroelástico, respectivamente. Segundo KOLOUŠEK (1984), os modelos aerodinâmicos são aqueles usados em estudos que envolvem fenômenos induzidos pela componente constante do vento (às vezes também pela componente flutuante do vento) que não é influenciada pela resposta do modelo. Tais fenômenos incluem a determinação de coeficientes de pressão, a serem feitos no modelo rígido.
- ii) NÍVEIS DE ACURÁCIA E DE PRECISÃO: A complexidade do problema da interação do vento com a estrutura do silo, bem como as exigências para a preparação do modelo permitem adotar-se uma acurácia de  $\pm 20\%$  e precisão de 20% aos valores dos resultados para a caracterização do vento, quando comparados aos valores de referência dados pelas normas de vento. Em relação aos valores medidos de pressão, a precisão é de 1%.

- iii) **EXIGÊNCIAS DE SIMILARIDADE:** As condições de semelhança para a geometria, materiais, e solicitações nos silos são definidas pelo uso dos números adimensionais, de acordo com Leis de Semelhança Física. As solicitações são oriundas da ação do vento e de acordo com a variação da velocidade média do escoamento de ar e da turbulência gerados no túnel. Na verificação das condições de semelhança é importante assinalar as que não são alcançadas e as técnicas usadas para garantir a similaridade.
- iv) **ESCOLHA DOS MATERIAIS:** Os materiais são escolhidos para simular o comportamento da casca e das colunas do cilindro do modelo flexível e atender às semelhanças de rigidez, de aerodinâmica e de geometria; na cobertura, para atender apenas às condições de geometria e de massa. Para os modelos rígidos, o material não pode se deformar e devem ser atendidas as escalas geométrica e aerodinâmica.
- v) **FASE DE CONSTRUÇÃO DOS MODELOS:** Os modelos são confeccionados com o máximo de fidelidade aos protótipos. O modelo flexível é fixado a uma base rígida. Os modelos rígidos são montados com e sem colunas posicionadas no lado externo da casca, e com colunas externas para o modelo flexível.
- vi) **CALIBRAGEM DO MODELO FLEXÍVEL:** A calibragem é feita com ensaios estáticos por meio de forças pontuais aplicadas no corpo cilíndrico.
- vii) **PREPARAÇÃO E CALIBRAGEM DO TÚNEL DE VENTO:** É feita antes dos ensaios com os modelos. São determinados os perfis de velocidade média, a intensidade normalizada da turbulência longitudinal, e as escalas de turbulência.
- viii) **INSTRUMENTAÇÃO E EQUIPAMENTO PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS:** São utilizados tomadas e transdutores de pressão, manômetros, anemômetro de tipo fio quente, com sistema automatizado de aquisição de dados, e um sistema de medição de deslocamentos por imagens.
- ix) **PROCESSAMENTO DOS DADOS:** Os dados são digitalizados e processados em forma de gráficos e de tabelas.
- x) **ANÁLISES DOS DADOS:** Os dados dos ensaios dos modelos rígidos são analisados quanto às distribuições de pressões e comparados aos da literatura, e os resultados do modelo flexível são analisados quanto aos modos de deflexão do cilindro, com medidas de deslocamentos, duração e intervalos de deflexão.

#### 4.1. Cálculo e dimensionamento dos protótipos

O dimensionamento dos protótipos dos silos tem como objetivo atender às condições de semelhança para a confecção dos modelos reduzidos.

Os produtos escolhidos para o cálculo dos silos protótipos são arroz, feijão, milho e soja, por serem os mais comuns no Brasil. As estruturas são calculadas para suportar qualquer um destes produtos.

São escolhidas duas relações  $H/D$  para os protótipos – 0,5 e 1,0 – para representarem as estruturas usuais de silos metálicos cilíndricos de chapas corrugadas, que são calculadas para suportarem os esforços devidos aos produtos.

A casca cilíndrica constitui-se em chapas metálicas corrugadas, ligadas entre si por parafusos de alta resistência, com a geometria dada nas figuras 21 e 22.

As colunas metálicas são aparafusadas às chapas corrugadas, e são calculadas para suportarem os esforços verticais de compressão devidos ao peso da cobertura e ao atrito do produto. Dependendo da altura, a coluna é composta por partes, com as ligações entre elas rígidas, à exceção das ligações com a base, que são rotuladas. Desde que a cobertura não é objeto de estudo à ação do vento, elas não são detalhadas, sendo usadas as características da forma geométrica externa a todos os modelos, e adicionalmente a similaridade de massa à cobertura do modelo flexível.

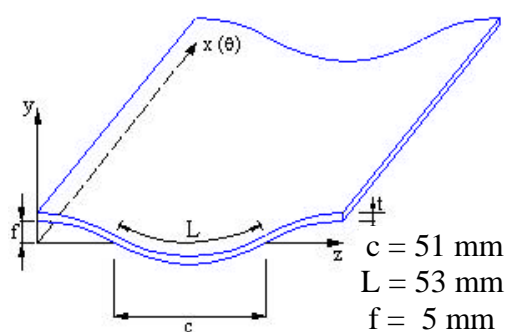


FIGURA 21 - Geometria das chapas

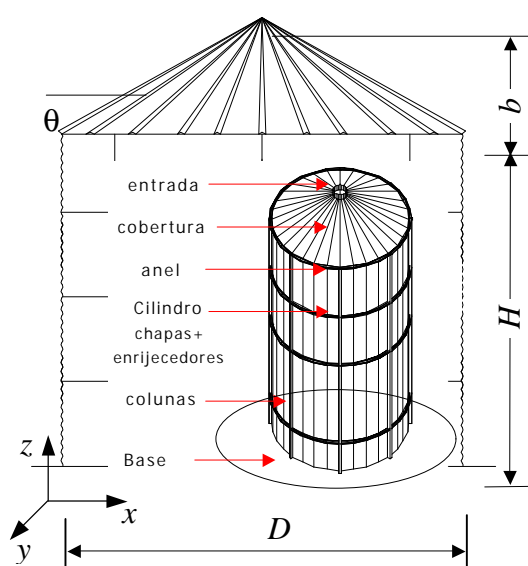
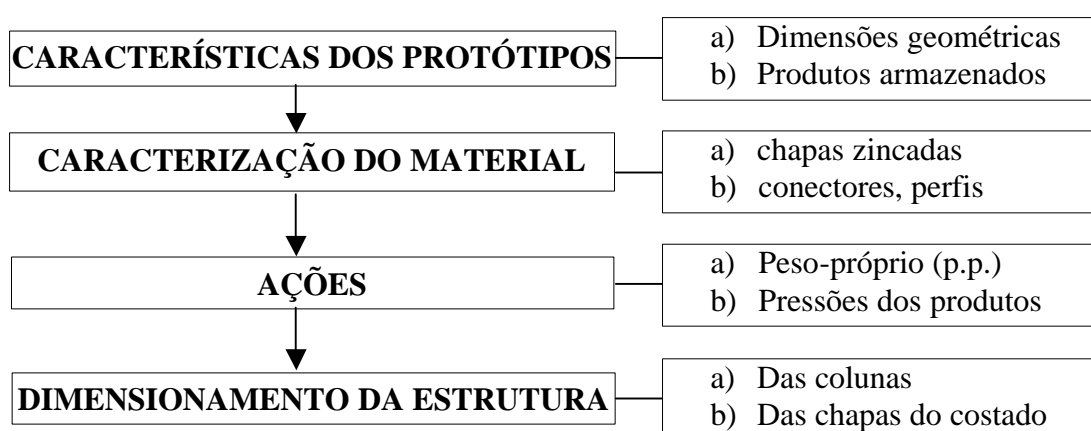


FIGURA 22 - Geometria do silo

O cálculo das pressões dos produtos é realizado segundo a ISO 11.697 (1995), o dos esforços nos silos com base na formulação para o Cálculo dos Esforços em Reservatórios Cilíndricos (ANDRADE JR 1998), a verificação das chapas conforme TRAHAIR et al. (1983), as verificações dos elementos metálicos segundo o texto base para a norma brasileira "Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio" da ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS - ABNT (2000). A figura 23 apresenta o fluxograma desde os cálculos até o dimensionamento do corpo cilíndrico.



**FIGURA 23 - Fluxograma de cálculo e dimensionamento dos protótipos**

As dimensões e as capacidades dos protótipos foram adotadas em função das maiores demandas comerciais deste tipo de silo, e estão indicadas na tabela 10.

**TABELA 10 - Dimensões dos protótipos**

H m	D m	b m	H/D	Vol. Total m <sup>3</sup>	Capacidade dada em número de sacos de 50 kg, densidade 750 kg/m <sup>3</sup>
14,5	29,0	7,2	0,5	11.175	167.625
21,5	21,5	5,3	1,0	8.456	126.840

Os cálculos até o dimensionamento das estruturas dos protótipos estão no Apêndice 1 - Cálculo dos Esforços e Dimensionamento de Silos Cilíndricos. As espessuras para as chapas e as dimensões das colunas, dos protótipos de H/D iguais a 0,5 e 1,0 estão definidas nas tabelas 11 e 12, respectivamente. A figura 24 mostra as características do tipo de perfil usado para as colunas e a figura 25 uma coluna dupla.

**TABELA 11 – Espessuras calculadas das chapas e colunas - protótipo H/D=0,5**

Cota cm	Chapas, t mm	$A_{cal}$ $cm^2$	$A_{col}$ $cm^2$	$b_w$ mm	$b_f$ mm	d mm	t = $r_i$ mm
1000	3,76	41,09*	22,97	300	85	25	4,76
2000	3,58	36,74*	18,63	300	85	25	4,76
3000	3,41	32,53*	16,87	300	85	25	4,76
4000	3,23	28,49*	15,08	300	85	25	4,76
5000	3,04	24,61*	13,28	300	85	25	4,76
6000	2,85	20,92	22,97	300	85	25	4,76
7000	2,64	17,43	18,63	300	85	25	4,76
8000	2,43	14,14	15,08	300	85	25	4,76
9000	2,2	11,09	11,45	300	85	25	4,76
10000	1,96	8,27	9,6	300	85	25	4,76
11000	1,72	5,71	6,39	100	50	17	3,04
12000	1,46	4,30	4,93	100	50	17	2,25
13000	1,19	3,11	4,93	100	50	17	2,25
14500	0,9	1,92	4,93	100	50	17	2,25

\* Colunas duplas, com área igual a  $2A_{col}$ . Total de 48 colunas no perímetro.

**TABELA 12 - Espessuras calculadas das chapas e colunas - protótipo H/D=1,0**

Cota cm	Chapas, t mm	$A_{cal}$ $cm^2$	$A_{col}$ $cm^2$	$b_w$ mm	$b_f$ mm	d mm	t = $r_i$ mm
1000	2,97	63,17*	34,44	300	85	25	7
2000	2,91	59,00*	29,76	300	85	25	6
3000	2,84	54,89*	29,76	300	85	25	6
4000	2,77	50,84*	27,39	300	85	25	5,5
5000	2,69	46,86*	25	300	85	25	5
6000	2,61	42,95*	22,97	300	85	25	4,76
7000	2,52	39,13*	22,97	300	85	25	4,76
8000	2,43	35,40*	18,63	300	85	25	3,75
9000	2,33	31,76*	16,87	300	85	25	3,35
10000	2,23	28,23*	15,08	300	85	25	3,04
11000	2,12	24,83*	13,28	300	85	25	2,66
12000	2,00	21,55	22,97	300	85	25	4,76
13000	1,87	18,41	18,63	300	85	25	3,75
14000	1,74	15,43	16,87	300	85	25	3,35
15000	1,59	12,62	13,28	300	85	25	2,66
16000	1,44	9,99	11,45	300	85	25	2,25
17000	1,28	7,57	9,6	300	85	25	2
18000	1,11	5,38	9,6	300	85	25	2
19000	0,93	3,15	9,6	300	85	25	2
20000	0,73	2,28	9,6	300	85	25	2
21500	0,52	1,41	9,6	300	85	25	2

\* Colunas duplas, com área igual a  $2A_{col}$ . Total de 36 colunas no perímetro.

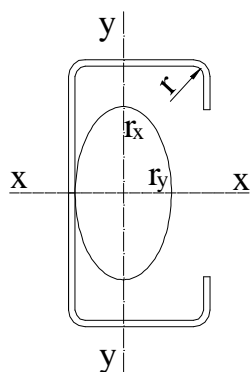


FIGURA 24 - Perfil das colunas

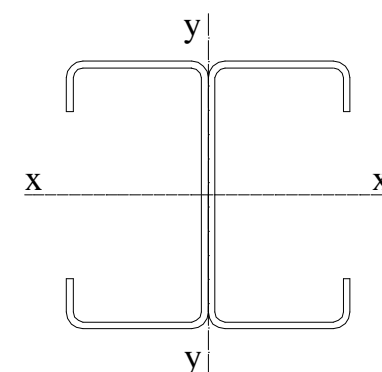
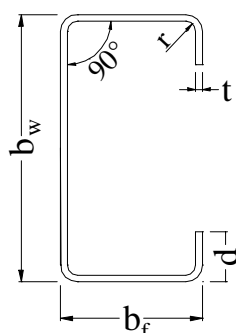


FIGURA 25 - Coluna dupla

As colunas estão distribuídas no perímetro dos silos, onde a disposição das colunas de perfil simples, figura 22, é com o eixo x-x alinhado na direção radial, e a das colunas de perfil duplo, figura 23, é com o eixo y-y na direção radial.

As chapas corrugadas têm 1100 x 2000 mm e são em aço ZAR-345,  $f_y = 345$   $f_u = 430$  MPa, NBR 10735 (1989), conectadas por parafusos comuns ASTM 307 de 8 mm, e o aço dos perfis formados a frio é A-570C,  $f_y = 25$  e  $f_u = 400$  MPa.

Considerando-se a densidade do aço igual a  $7850 \text{ kg/m}^3$ , o peso da cobertura estimado em  $157 \text{ N/m}^2$ , conforme ESTEVES (1989), e as dimensões das chapas e dos perfis dados nas tabelas 11 e 12, as massas e os pesos dos protótipos estão apresentados na tabela 13.

TABELA 13 –Pesos e massas dos protótipos

Protótipo	Peso, kN				Massa, kg
	Costado	Colunas	Cobertura	Total	Total
H/D = 0,5	241,14	101,71	103,70	446,38	45.480
H/D = 1,0	217,89	179,76	58,26	455,73	46.475



## 4.2. Dimensionamento dos modelos

O dimensionamento dos modelos é feito de acordo com as leis de semelhança deduzidas no item 3.2.1. Análise dimensional, admitindo-se que: i) o fator de geometria é  $\lambda_L = 1/42$ , e ii) o fator da velocidade do vento é  $\lambda_U = 1/2$ .

O fator geométrico é escolhido em função do tamanho da seção do túnel, das condições de simulação do vento e das respostas dos modelos. Para o flexível, uma escala pequena acarretaria em deslocamentos pouco perceptíveis da casca cilíndrica, e, para os rígidos, uma escala grande exigiria correções significativas das pressões.

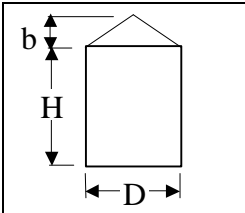
O fator de velocidade é escolhido de modo a se alcançar a maior similaridade aerodinâmica possível, considerando-se as características do túnel.

O cálculo completo da análise dimensional está no Apêndice 2 - Cálculo dos Modelos Cilíndricos de Silos.

### 4.2.1. Modelos rígidos

Os modelos rígidos têm relações  $H/D=0,5$  e  $1,0$  e são denominados modelo 0,5 e modelo 1,0. As dimensões estão na tabela 14, considerando-se a razão  $H/D$ , altura da cobertura cônica  $b = 0,25D$ , e uma redução geométrica de escala igual a  $1/42$ , que corresponde a uma taxa de bloqueio igual a 10% da área da seção do túnel.

**TABELA 14 - Dimensões dos modelos em função dos diâmetros dos protótipos**

	D protótipo mm	D mm	H mm	b mm	H/D	Seção - mm área - m <sup>2</sup> do túnel
	29.000	690	345	173	0,5	1220 x 2440
	21.500	510	510	128	1,0	2,97

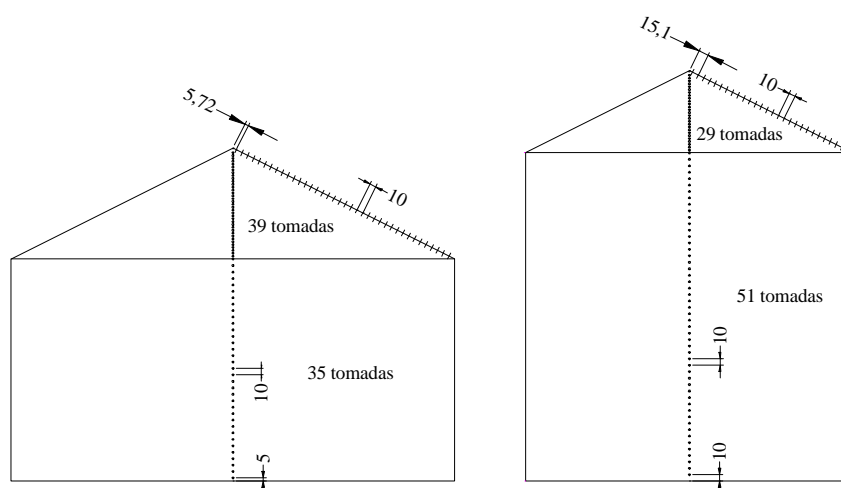
Em cada modelo há um conjunto de orifícios para as tomadas de pressão contínua e igualmente distribuídos a 10 mm a partir do topo do cilindro, até a base e

até o ápice da cobertura. A figura 26 mostra os modelos com superfície lisa e a figura 27 os com elementos externos - colunas no corpo e fios na cobertura.

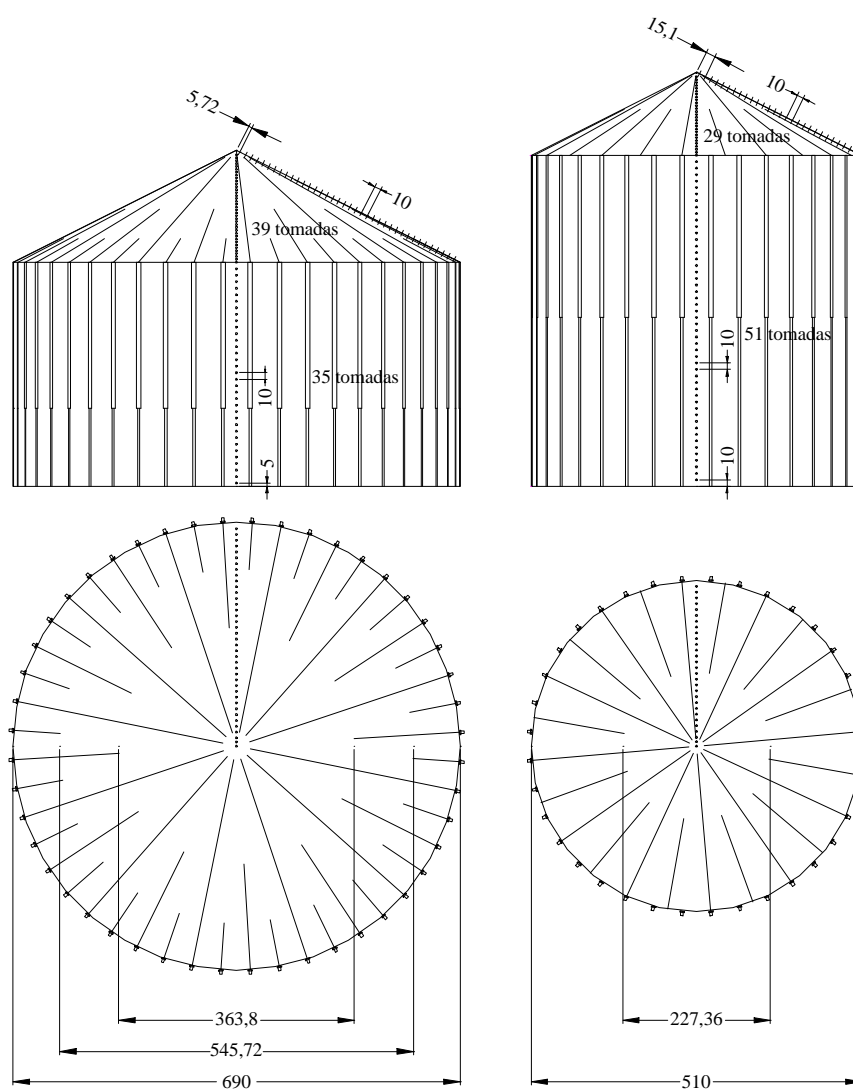
As dimensões das colunas para o corpo cilíndrico e dos fios para a cobertura cônica são mostradas na tabela 15. São 48 colunas no corpo do modelo 0,5 e 36 colunas no corpo do modelo 1,0, sendo as de 4x7 mm na porção inferior e as de 7x2 mm na porção superior. Nas coberturas, são 12 fios grandes e 12 médios em ambos modelos, e 24 fios curtos adicionalmente à do modelo 0,5.

**TABELA 15 - Dimensões das colunas e dos fios para os modelos**

	Dimensões das colunas, mm A largura segue a direção tangencial			Fio, $\phi = 1,0$ mm
	Comprimento	Largura	Espessura	Comprimento
Modelo 0,5	120	4	7	724
	225	7	2	365 e 161
Modelo 1,0	260	4	7	544
	250	7	2	316



**FIGURA 26 - Modelos com tomadas de pressão e superfície lisa**



**FIGURA 27 - Modelos com tomadas de pressão e elementos externos**

#### 4.2.2. Modelo flexível

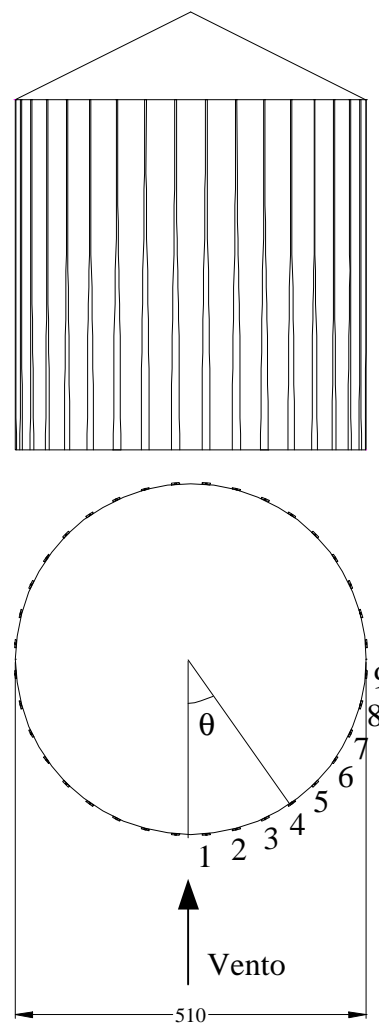
O modelo flexível é calculado para atender às condições de semelhança de geometria, de rigidez, de massa, e de aerodinâmica em relação ao protótipo  $H/D=1,0$ . A confecção de apenas um modelo é justificada por contingência de custo, sendo adotada a relação  $H/D=1,0$  por ser a mais comum à construção de silos.

O modelo flexível 1,0 é constituído em uma casca cilíndrica de Melinex© com 510 mm de diâmetro e de altura, altura da cobertura igual a 128 mm, figura 26,

com uma espessura nominal de 0,095 mm, correspondente à espessura média da porção intermediária do cilindro ( $0,4H < \text{média } (t) < 0,8H$ ); 36 colunas de PETP de espessura nominal de 2,02 mm, numeradas a partir da linha de estagnação e considerando-se a simetria, e largura variável em relação à altura, como mostrado na tabela 16.

**TABELA 16 – Largura variável das colunas do modelo flexível**

z mm	largura mm
24	11,97
47	11,28
71	11,28
95	10,83
119	10,31
142	10,03
166	10,03
190	8,63
213	7,99
237	7,44
261	6,72
285	5,01
308	4,32
332	3,99
356	3,36
380	2,94
403	2,67
427	2,67
451	2,67
474	2,67
498	2,67
510	2,67



**FIGURA 28 – Modelo flexível**

A direção  $z$  é vertical e a largura tangencial à casca cilíndrica. A cobertura segue a redução das escalas de geometria e de massa, com a finalidade de enrijecer o topo do cilindro, sendo construída em madeira balsa, para manter a relação massa/volume, e em papel impermeável para o acabamento externo final.

### 4.3. Geração e caracterização do escoamento no túnel de vento

O escoamento de ar gerado no túnel de vento deve atender à redução das escalas geométrica e cinemática, de tal modo que seja simulada a porção inferior da camada limite, e as condições e os fatores para o silo e o terreno sejam definidos de modo a serem traçados os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, de acordo com as normas ESDU (1995) e NBR 6123 (1990). Também é verificada a escala espacial do vento, que indica as dimensões médias dos maiores turbilhões e, no presente estudo, são da ordem de 400 mm.

A NBR 6123 (1990) utiliza três fatores,  $S_i$ , para o cálculo do perfil de velocidade, considerando-se uma velocidade básica  $V_o$  para uma rajada de 3s.

$$V(z) = S_1(z).S_2(z).S_3.V_o \quad (35)$$

A velocidade básica é adotada igual a 30 m/s devido à necessidade de serem atendidas as similaridades dos perfis de velocidade e de intensidade de turbulência.

O silo é considerado em um terreno de campo do tipo plano a levemente ondulado com obstáculos de cota média igual a 1,0 m e poucos quebra-ventos de árvores e edificações baixas e esparsas, ou seja, é um terreno de categoria II com uma edificação (o silo) de classe B, conforme a NBR6123 (1990).

O fator  $S_1$  é topográfico, sendo adotado para um terreno com inclinação  $\theta < 3^\circ$ , e a diferença entre a altura mínima e a altura máxima do terreno é 50 m. O fator  $S_2$  é relacionado à rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno. O fator  $S_3$  é o fator estatístico que considera o grau de segurança e a vida útil da edificação que, para os silos, é igual a 0,95.

Para o perfil de intensidade de turbulência na direção longitudinal, é usada a formulação dada por BLESSMANN (1995), que é usada pela NBR 6123 (1990).

$$I(z) = 2,58\sqrt{C_{as}}\left(\frac{10}{z}\right)^p \quad (36)$$

$$\text{onde } C_{as} = \frac{0,16}{\left(\ln\left(\frac{10}{z_o}\right)\right)^2}, \text{ para } p = 0,105.$$

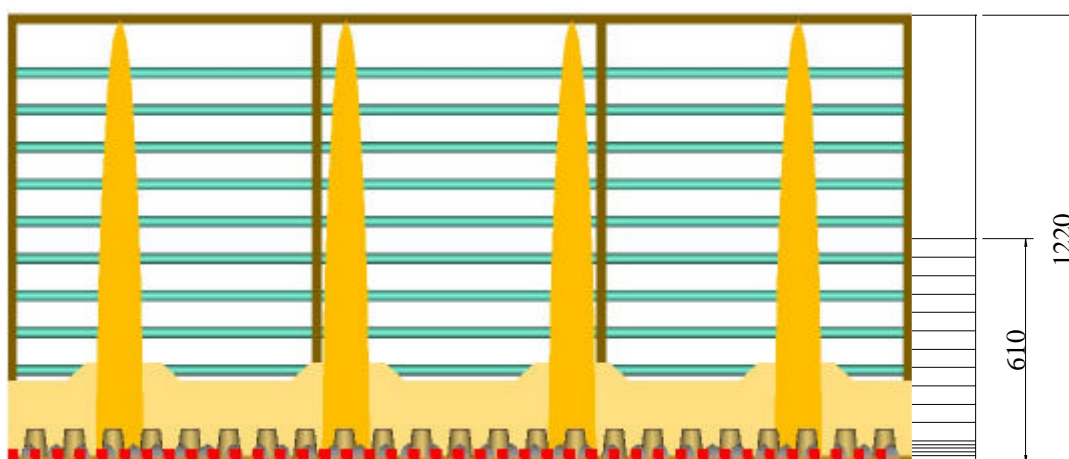
Os perfis do ESDU (1995) são calculados a partir do programa do item 92032 "Programa computacional para velocidades do vento e propriedades de intensidade de turbulência". Os parâmetros de entrada no programa são a latitude (27 graus), velocidade do vento considerando-se o fator de rajada (30 m/s), direção relativa ao norte (180°), altura de referência para o vento (10 m), rugosidade de referência  $z_0$  (0,08), tempo de rajada (3 s), número de mudanças de rugosidade do terreno (zero), rugosidade local (0,08), número de alturas para o cálculo da velocidade (18), e topografia plana a levemente ondulada.

O eixo em que são feitas as medições do vento está situado no centro da mesa giratória do túnel e é dividido em 17 pontos na vertical. O primeiro ponto situa-se 10 mm acima do piso, os cinco pontos seguintes são espaçados igualmente a 10 mm, e os últimos onze pontos são igualmente espaçados a 50 mm. Os 17 pontos cobrem uma altura total de 610 mm.

A altura total de 610 mm é a máxima que pode ser alcançada no túnel, devido a limitações de construção, justificada pelo fato que as camadas limites usualmente simuladas estão na escala de 1/300 até 1/100, que correspondem a perfis de alturas reais iguais a 366 m e 122 m, respectivamente.

Nos ensaios que são realizados nos modelos dos silos, a camada limite é simulada a uma escala de 1/42, o que dá uma altura real de 51,24 m (1220 mm de altura da seção do túnel). Portanto, a altura máxima para as medições da velocidade do vento é 25,62 m (610 mm), que é o suficiente para envolver o modelo 0,5 que tem uma altura total de 517,5 mm, mas levemente abaixo da altura total do modelo 1,0 que é 637,5 mm, ou 26,78 m em escala real.

As figuras 29 e 30 ilustram os dispositivos e as alturas de medições das características do escoamento gerado no túnel de vento.



**FIGURA 29 - Vista frontal dos dispositivos e pontos de aquisição de dados**



**FIGURA 30 - Vista lateral dos dispositivos e pontos de aquisição de dados**

Em cada um dos 17 pontos os dados brutos são coletados com o auxílio de um anemômetro de fio quente com tempo de aquisição igual a 15 s (correspondente a uma velocidade média de 15 m/s e uma escala geométrica de 1/42, tal que o tempo relativo em escala real é igual a 5 min e 15 s).

Os valores dos dados são convertidos de voltagem para velocidade pela calibragem do anemômetro com um tubo de Pitot localizado a uma altura de 238 mm (equivalente a 10 m em escala real).

O sistema do anemômetro de fio quente foi ajustado para exibir um decaimento simultaneamente exponencial e oscilatório. Isto significa que este caso "representa a resposta máxima à baixa frequência do anemômetro bem como a mais alta frequência de corte" (FREYMUTH 1977).

#### **4.4. Ensaios aerodinâmicos dos modelos rígidos**

Os modelos rígidos atendem à condição de semelhança aerodinâmica e geométrica, quando se admite que os experimentos dos modelos cilíndricos em túnel de vento apresentam os valores das pressões independentes do número de Reynolds - caso que ocorre para o regime supercrítico, conforme a literatura. Isto significa que os coeficientes de pressão são iguais no modelo e no protótipo.

Cada teste constituiu-se em posicionar um modelo rígido no centro da mesa giratória, submetê-lo ao escoamento de ar gerado no túnel e medir as pressões externas no corpo cilíndrico e da cobertura cônica à medida que o modelo era girado.

As pressões foram medidas através da linha de tomada de pressões em cada modelo, como ilustrada nas figuras 24 e 25. A linha de tomadas era posicionada inicialmente na direção do escoamento de ar, igual a  $0^\circ$ , calibrada para a pressão medida anteriormente à altura equivalente a 10 m (238 mm), e depois girada em acréscimos de  $10^\circ$  até completar  $180^\circ$ . A escolha do valor do acréscimo foi definida com o auxílio de testes preliminares, em que as distribuições dos coeficientes de pressões foram comparadas para valores de  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $15^\circ$ . O valor  $15^\circ$  apresentou diferenças significativas nas distribuições e o valor  $5^\circ$  ocasionaria mais ensaios sem que houvesse uma diferença substancial relativa ao valor  $10^\circ$ . Um fato que colaborou para o valor adotado de  $10^\circ$  é que a NBR 6123 (1990) apresenta os coeficientes de pressão externa de  $0^\circ$  a  $100^\circ$  de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , e de  $100^\circ$  até  $180^\circ$  de  $20^\circ$  em  $20^\circ$ .

Para tomar partido da simetria dos modelos e da condição de escoamento, foi adotado o procedimento para confirmar a simetria do escoamento em torno do modelo. Foram obtidas as distribuições de pressões para a linha de tomadas nas posições  $200^\circ$ ,  $230^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $310^\circ$ ,  $330^\circ$  e  $360^\circ$ , sendo confirmada a simetria e, portanto, os modelos rígidos foram testados para uma rotação total de  $180^\circ$ .

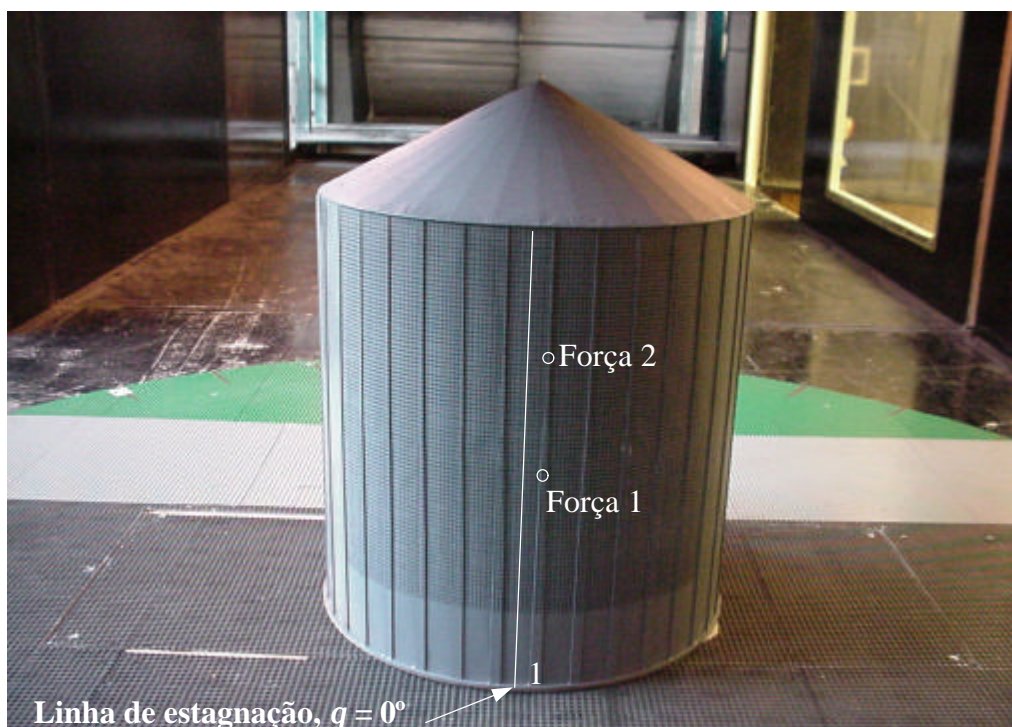
Como auxiliar à interpretação dos gráficos de distribuição de pressão foram realizadas visualizações do escoamento de ar nos modelos, por meio de linhas de seda fixadas às suas superfícies externas. As imagens dos modelos com fios de seda e submetidos ao vento no túnel estão apresentadas no Vídeo CD "Ensaio de Modelos de Corpo Cilíndrico e Cobertura Cônica em Túnel de Vento de Camada Limite".



#### 4.5. Ensaio estático do modelo flexível

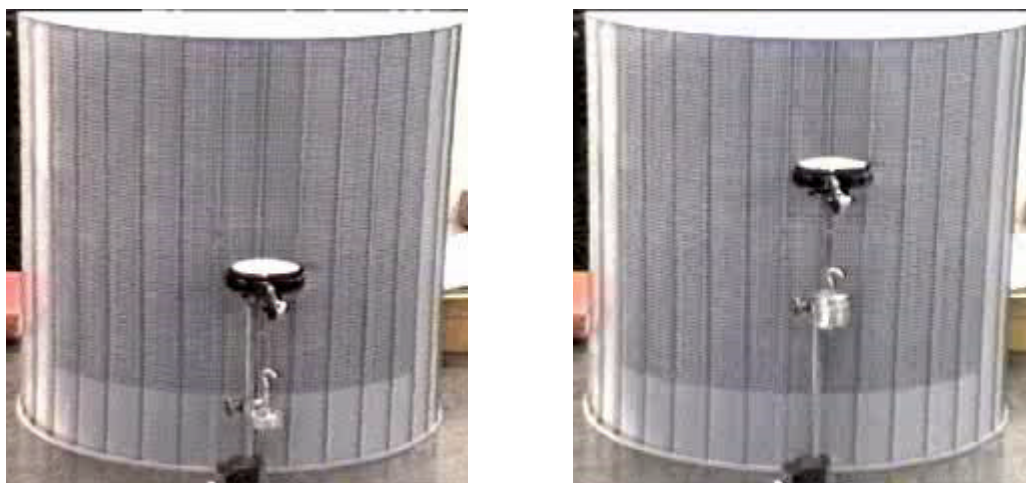
Os ensaios estáticos com aplicação de força pontual são efetuados no modelo flexível para servir de parâmetro às medições que são realizadas sob a ação do vento.

O modelo flexível é testado com forças aplicadas diretamente em uma coluna, com as posições indicadas pelas circunferências da figura 31. O reticulado se estende de 90 mm a partir da base até o topo do cilindro e  $\pm 40^\circ$  em relação  $\theta = 0^\circ$ . O tamanho nominal das divisões do quadriculado é 5 mm. A posição 1 é na coluna 1 à meia altura do cilindro, 255 mm, e a posição 2 está 125 mm acima da primeira.



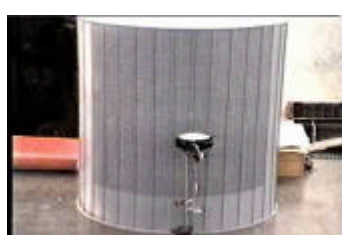
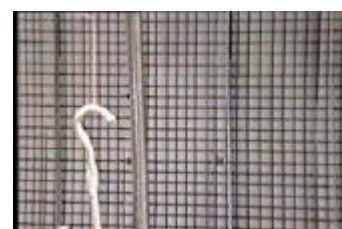
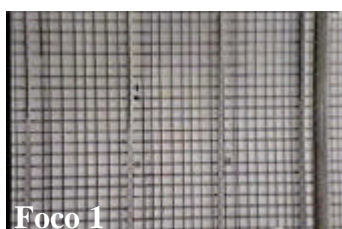
**FIGURA 31 - Modelo flexível 1,0 com reticulado e locais das cargas pontuais**

Os deslocamentos devidos às forças pontuais são medidos por meio de um transdutor mecânico linear, posicionado à meia altura do cilindro, 255 mm, e a aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de altura, 380 mm, como indicado na figura 32. As medições também são efetuadas a partir das imagens obtidas por câmeras de vídeo para três posições diferentes,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ , indicadas na figura 36, e três vistas com focos diferentes, foco 1 e foco 2, como ilustradas nas figuras 33, 34 e 35.



**FIGURA 32 – Aplicação das forças locais e o transdutor de deslocamentos no modelo flexível**

As figuras 33, 34 e 35 ilustram as gravações dos ensaios estáticos nas posições 1, 2 e 3, conforme a figura 34, para os focos 1 e 2, respectivamente, referentes ao modelo sem força aplicada, ou seja, em posição indeformada.



**FIGURA 33 – Vista  $V_1$   
do modelo flexível  
indeformado**

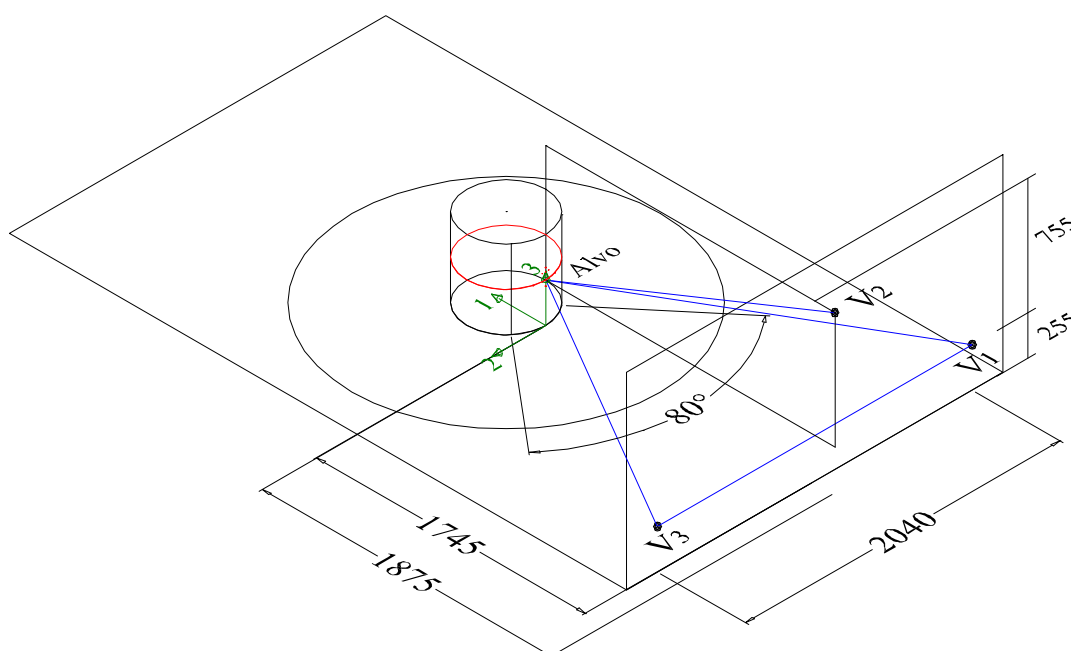
**FIGURA 34 – Vista  $V_2$   
do modelo flexível  
indeformado**

**FIGURA 35 – Vista  $V_3$   
do modelo flexível  
indeformado**

#### 4.6. Ensaios aeroelásticos do modelo flexível

Os ensaios aeroelásticos seguem o mesmo procedimento de filmagens do ensaio estático, sendo realizados no túnel de vento 8x4-ft, de seção 1220 x 2440 mm. As velocidades médias no túnel de vento a 238 mm de altura (10 m em escala real), são aumentadas gradualmente e o modelo é filmado para as velocidades de 1,8 m/s (6,5 km/h), 3,8 m/s (13,7 km/h), 5,6 m/s (20,2 km/h) e 6,93 m/s (25 km/h).

Os deslocamentos máximos do modelo flexível na região a barlavento à meia altura do corpo cilíndrico são medidos por meio de imagens obtidas por câmeras dispostas em três posições diferentes, para o foco 1. É importante salientar que estas posições diferentes de gravação são exigidas para a calibragem dos deslocamentos, a partir dos ensaios estáticos, na direção radial dos pontos dados pelas interseções das linhas do reticulado. A figura 36 mostra as posições da câmera,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ , para as filmagens tanto dos ensaios estáticos, quanto dos ensaios aeroelásticos, relativas à seção do túnel de 1220 x 2440 mm.



**FIGURA 36 - Posições para a câmera relativas à seção do túnel**

#### 4.7. Visão geral dos ensaios

As características dos ensaios dos modelos em túnel de vento estão resumidas na tabela 17 para uma visão geral do processo de testes e dos resultados esperados.

**TABELA 17 – Resumo das características dos ensaios**

Geometria dos Modelos	Cilindro H/D	Cobertura inclinação	Túnel de Camada Limite	Terreno	Condições dos modelos no túnel				
	0,5 – 1,0	26,57°	Circulação externa	Campo	Modelos isolados				
Programa de Testes									
Escala (modelo/protótipo) ( chapas corrugadas*, colunas**)				Medições					
Geom	Rigidez		Massa	Tensão	Vel	Tempo	Reynolds	Pressões	Cotas de referência
1/42	E	I, x10 <sup>-6</sup>	1,26 x10 <sup>-8</sup>	2/7* 1/3**	1/2	1/21	7,36x10 <sup>5</sup> 6,14x10 <sup>5</sup>	Médias	H – Cilindro H+b - Cobertura
	3/140*	3,82*							
	2/140**	5,62**							
Tipos de Modelos									
Aerodinâmico – H/D = 0,5 e 1,0			Aeroelástico – H/D = 1,0						
Em madeira, superfícies lisa e com nervuras. Tomadas de pressão em linha. Modelo é girado para medidas de pressão.			Casca em poliéster, nervuras em polietileno, similaridade nas escalas aerodinâmica, de rigidez, e de massa; cobertura em madeira leve, escalas de geometria e de massa.						
Tipos de Resultados									
Modelos rígidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>.Distribuições de pressões na superfície</li> <li>.Coeficientes de arrasto no cilindro e de sustentação e de arrasto na cobertura</li> <li>.Visualização de escoamento com linhas de seda na superfície dos modelos</li> </ul>								
Modelo Aeroelástico	<ul style="list-style-type: none"> <li>.Medições dos deslocamentos estáticos na coluna 1 a z = 0,5H e z = 0,75H</li> <li>.Medições dos deslocamentos aeroelásticos do corpo cilíndrico, em z = H/2, -4,5° &lt; q &lt; +4,5° (colunas 1), por meio de imagens</li> <li>.Medições dos tempos de deflexão da casca cilíndrica</li> <li>.Configurações de deformações por meio de imagens do modelo</li> </ul>								

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE

---

---

A abordagem definida na metodologia e nos procedimentos caracteriza os processos dos ensaios para as medições das características do escoamento de ar gerado no túnel de vento, das distribuições de pressões nos modelos rígidos e das configurações de deflexão e dos deslocamentos do modelo flexível. A finalidade é processar e analisar todos os dados obtidos em cada ensaio.

Os ensaios de caracterização do escoamento de ar no túnel de vento e de medidas de pressões nos modelos rígidos foram registrados em arquivos digitais de dados, em planilhas que contêm os parâmetros usados para a calibragem e medições com o anemômetro de fio quente e as correspondentes respostas de velocidades e desvios padrão médios, e as respostas dos transdutores na forma de pressões médias.

Os ensaios estáticos foram registrados em arquivo digital de dados, em planilhas que contêm os valores dos deslocamentos para as forças aplicadas ao modelo flexível. Os ensaios aeroelásticos, assim como os estáticos e os de visualização de escoamento de ar nas superfícies dos modelos rígidos de silos, foram registrados em imagens digitalizadas, formato DivX.

O processamento é feito nos dados do anemômetro de fio quente para o cálculo das velocidades e das intensidades de turbulência médias, e das escalas temporal e espacial da turbulência, nos dados de pressão externa dos modelos rígidos para o cálculo dos coeficientes de pressão, de arrasto e de sustentação, nos dados das filmagens dos modelos rígidos para a visualização do escoamento de ar em suas superfícies, e nos dados dos ensaios estático e aeroelástico do modelo flexível para a descrição do seu comportamento.

### 5.1. Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência e escalas de turbulência

Os dados obtidos no túnel consistem em respostas elétricas do anemômetro de fio quente em volts, convertidas para velocidade em m/s, e normalizadas em relação à velocidade média igual a 14,43 m/s a 238 mm de altura (10 m em escala real).

Os resultados são apresentados para a velocidade e a intensidade de turbulência calculadas para atenderem às normas ESDU (1995) e NBR 6123 (1990).

Observando-se a figura 35 vê-se que o perfil das velocidades normalizadas dos ensaios segue o perfil da NBR 6123 (1990) até 18 m de altura, com as diferenças em torno de 2%. A partir dos 18 m até os 25 m, as diferenças aumentam gradualmente até 12%. A tendência do perfil experimental, 1/42, é de apresentar velocidades maiores que as do perfil da NBR 6123 (1990) para alturas maiores.

Para o perfil da ESDU (1995), figura 35, as diferenças alcançam um máximo de 50% a 1 m de altura, reduzindo para 21% a 2,5 m e 8,79% a 4,6 m. Esta diferença diminui ainda mais e, de 7 m a 25 m, é menor que 4%.

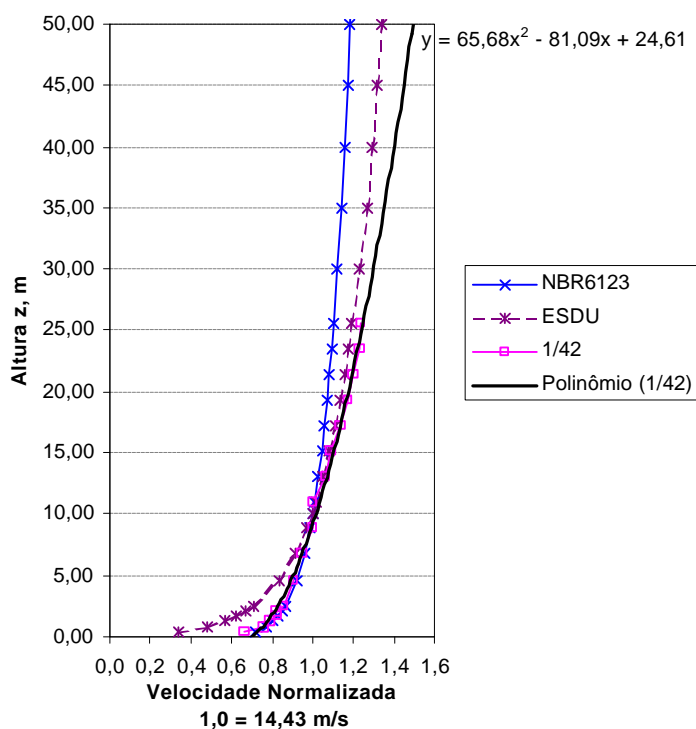


FIGURA 37 – Perfis de velocidade normalizada e linha de tendência

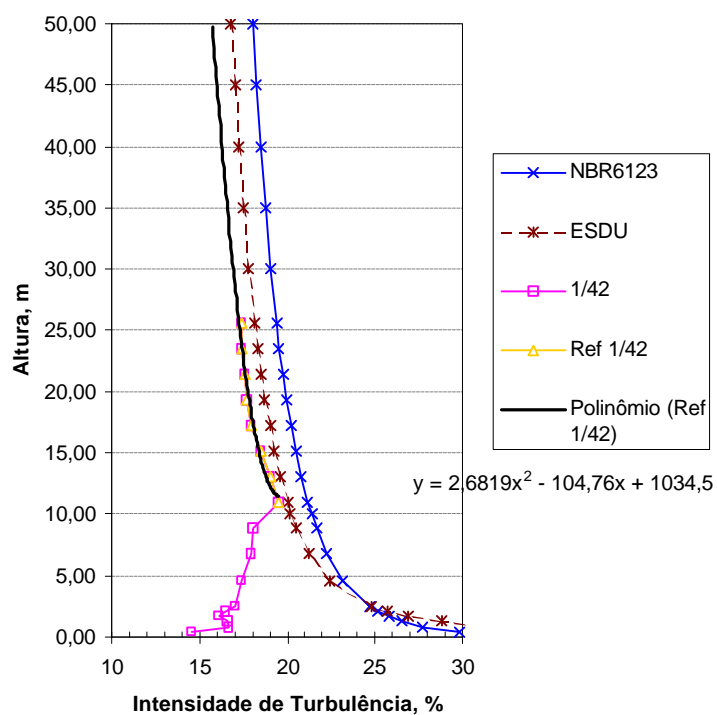
Se for composta uma curva de tendência, e.g., um polinômio do segundo grau, como mostrado na figura 35, considerando-se  $x$  as abscissas,  $y = 65,676x^2 - 81,091x + 24,611$ , então para  $z = 30$  m a velocidade normalizada  $U_N$  é estimada em 1,298 que, comparada à velocidade de 1,122 da NBR dá  $(1,298-1,122)/1,122 = 15,7\%$  e para a velocidade calculada pela ESDU a diferença é de 5,4%.

As diferenças percentuais  $100.(U_N-U_{N,exp})/U_N$  entre os valores experimentais das normas ESDU (1995) e NBR 6123 (1990) estão mostradas na tabela 18.

**TABELA 18 – Comparação entre as velocidades de ensaio e as das normas**

$z$ m	NBR %	ESDU %
0,42	7,85	-95,58
0,84	1,70	-57,56
1,26	2,30	-39,16
1,68	1,08	-31,40
2,10	3,78	-21,79
2,52	0,92	-21,08
4,62	1,62	-8,79
6,73	1,00	-4,12
8,83	-1,35	-3,26
10,00	0,00	0,00
10,93	0,93	1,32
13,03	-3,13	-0,95
15,13	-4,04	-0,46
17,23	-0,97	3,59
19,34	-9,90	-3,91
21,44	-10,85	-3,95
23,54	-12,04	-4,33
25,64	-12,39	-3,98

Para o perfil experimental da intensidade de turbulência normalizada, indicado na escala 1/42 na figura 36, há diferenças acima de 20% até os 4,6 m. Os valores medidos estão em torno de 17% a 20% entre 5 e 10 m de altura, para valores esperados na faixa de 20 a 23%. Para alturas acima de 10 m, os valores estão mais próximos dos da norma ESDU (1995), com diferenças  $\cong 5\%$ , que da NBR 6123 (1990), com diferenças  $\cong 10\%$ . As diferenças entre os valores esperados e os valores medidos estão apresentados na tabela 19, em que os percentuais são  $(I_N-I_{N,exp})/I_N$ .



**FIGURA 38 – Perfis da intensidade de turbulência normalizada**

**TABELA 19 - Comparação entre os I de ensaio e os I das normas**

z m	NBR %	ESDU %
0,42	51,25	65,47
0,84	39,92	48,28
1,26	37,69	42,53
1,68	37,61	40,22
2,10	34,43	35,76
2,52	31,03	31,31
4,62	25,06	22,46
6,73	19,54	15,43
8,83	16,69	12,00
9,99	8,88	3,11
10,93	8,88	2,63
13,03	10,22	3,01
15,13	10,98	3,62
17,23	12,25	5,49
19,34	12,62	5,67
21,44	11,80	4,92
23,54	11,93	5,05
25,64	10,74	3,66

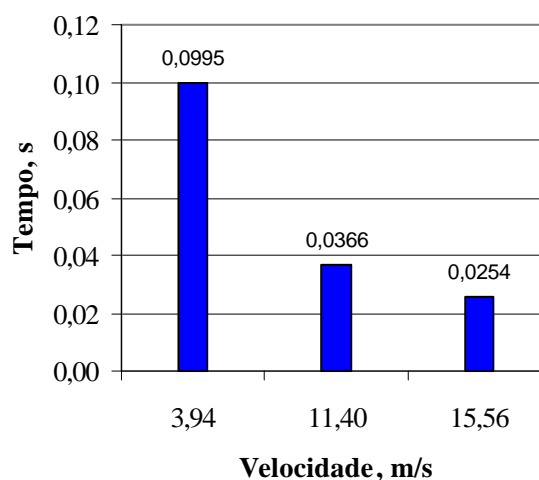


Os resultados apresentaram discrepâncias nas velocidades para os 5 m iniciais em relação aos dados do ESDU (1995), em que a 1,26 m a diferença alcança 39%, mas entre 6,7 m e 25,64 m são no máximo 4%. Para o perfil da NBR 6123 (1990) há uma concordância dos valores até os 18 m de altura, com diferenças máximas de 4%; de 19,24 a 25,64 m esta diferença cresce gradualmente até atingir 12%.

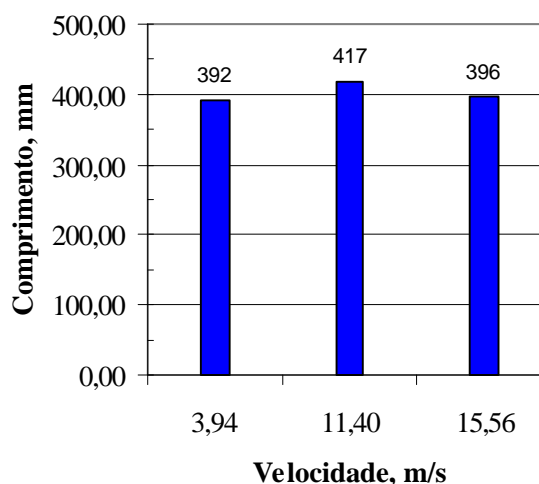
Para as intensidades de turbulência, as diferenças dos dados experimentais relativas ao ESDU (1995) são 42,5% a 1,26 m, 22,5% a 4,6 m e menos que 6% a partir de 10 m até 25,64 m. As diferenças em relação à NBR 6123 (1990) são mais pronunciadas, sendo da ordem de 20% de 5 m a 10 m, e de 10% acima de 10 m.

Considerando-se o fato que o nível de acurácia é igual a 30%, os resultados obtidos atendem às exigências de simulação dos perfis de velocidade e de intensidade de turbulência. As diferenças máximas nas velocidades são pequenas, da ordem de 10% e, deste modo, garante-se a simulação correta das forças médias do vento. Em relação às intensidades de turbulência, note-se que somente abaixo de 5 m é que as diferenças são maiores que 20%.

As escalas de turbulência são obtidas a partir da autocorrelação entre as componentes flutuantes em torno da velocidade média, para três faixas de velocidades: 1) baixa,  $U = 3,94$  m/s, 2) média,  $U = 11,40$  m/s, e 3) alta,  $U = 15,56$  m/s. As velocidades de referência são medidas a 238 mm de altura. As figuras 37 e 38 mostram os gráficos para as escalas temporal e espacial da turbulência.



**FIGURA 39 – Escalas temporais de turbulência**



**FIGURA 40 – Escalas espaciais de turbulência**

Os comprimentos de turbulência são um pouco menores que os diâmetros dos modelos, contudo são de tamanho suficiente para provocarem uma resposta global do modelo flexível. É importante notar-se que os modelos rígidos foram ensaiados às velocidades máximas, em torno de 15 m/s, e o modelo flexível até 7,0 m/s.

A expressão do ESDU (1974),  $L_1 = 25z^{0,35}z_0^{-0,063}$ , para  $z = 10$  m,  $z_0 = 0,08$ , fornece um comprimento longitudinal de turbulência igual a  $L_1 = 65,6$  m. Com base na figura 40, o valor obtido experimentalmente foi  $L_1 = 0,4 \times 42 = 16,8$  m.

## **5.2. Distribuições de pressões nos modelos rígidos**

Os resultados são os coeficientes de pressões externas, calculados para os modelos 0,5 e 1,0, com a altura de referência igual a H para o cilindro e a H+b para a cobertura cônica, lembrando-se que  $b=D/4$ , para o modelo 0,5 a altura  $H=0,5D=345$  mm, e para o modelo 1,0 a altura  $H=D=510$  mm.

As pressões dinâmicas de referência para o cálculo dos coeficientes de pressão são  $149 \text{ N/m}^2$  a 345 mm, para o cilindro e  $188 \text{ N/m}^2$  a 517,5 mm, para a cobertura do modelo 0,5. Para o modelo 1,0 as pressões correspondentes são  $185 \text{ N/m}^2$  a 510 mm, e  $198 \text{ N/m}^2$  a 637,5 mm.

Como consequência da linha de tomadas de pressão (vide figuras 26 e 27) ser girada a cada  $10^\circ$ , num total de  $180^\circ$ , ambos modelos têm uma rede de tomadas no costado definida por uma malha de 10 mm na direção vertical e  $10^\circ$  no perímetro, e uma rede na cobertura definida por malhas com a linha da geratriz dividida a 10 mm, da base ao ápice, e  $10^\circ$  no perímetro da base. Deste modo, a rede de tomadas de pressão do modelo 1,0 conta com 1388 pontos e a do modelo 0,5 com 1502 pontos.

Os parâmetros definidos para o controle das válvulas automáticas de tomadas de pressão, tipo “scanivalves”, em cada ponto da rede, são tempo de aquisição, 5 s; frequência, 300 Hz; pausa depois de cada medição, 1 s; pausa antes do início da medição nas tomadas, 3 s. É importante notar que o tempo de aquisição igual a 5s é consideravelmente maior que o período da flutuação, isto é, os valores usados para o cálculo das velocidades médias são representativos para a caracterização das linhas de corrente do escoamento turbulento.

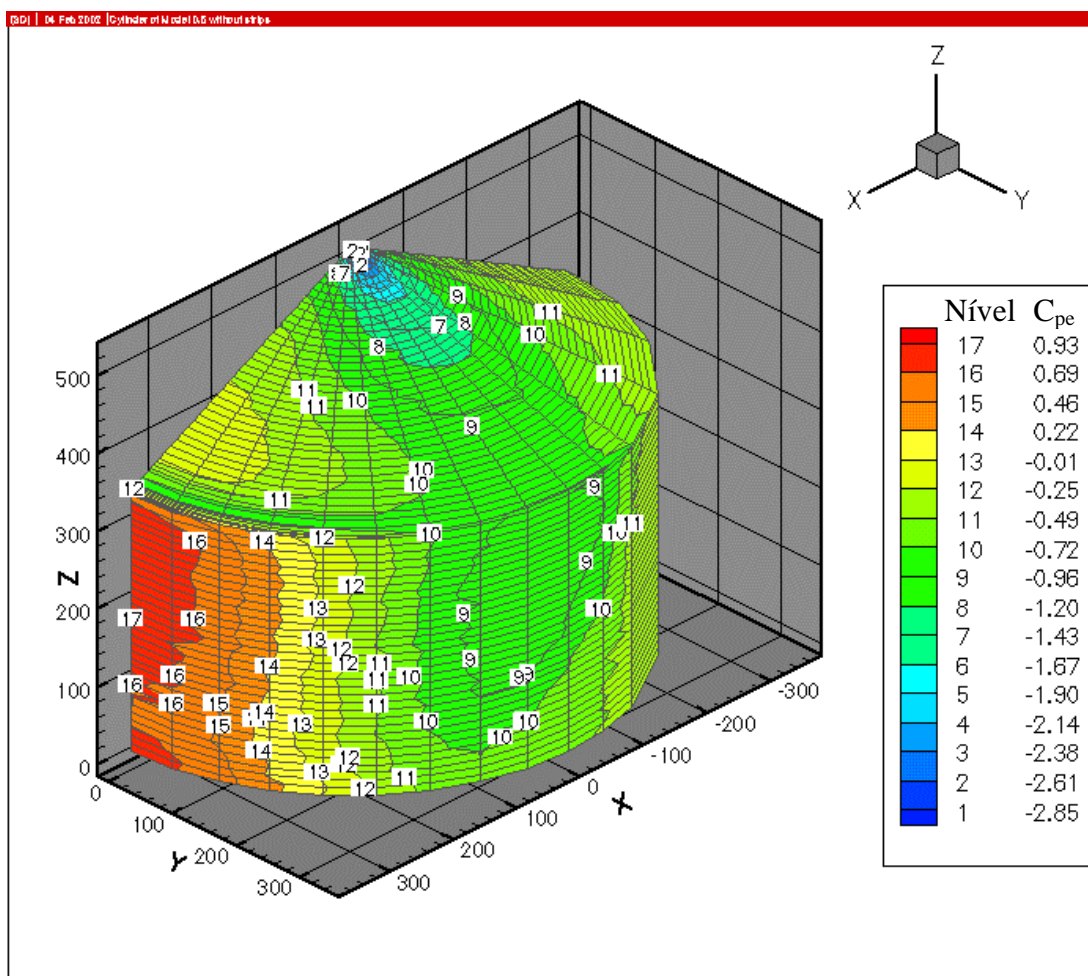
### *5.2.1. Coeficientes de pressão para o modelo 0,5*

Os coeficientes de pressão para o modelo 0,5 são apresentados para o modelo com a superfície lisa e com os elementos externos. A figura 41 mostra o modelo 0,5 com os elementos externos; a superfície lisa é o mesmo modelo sem os elementos.



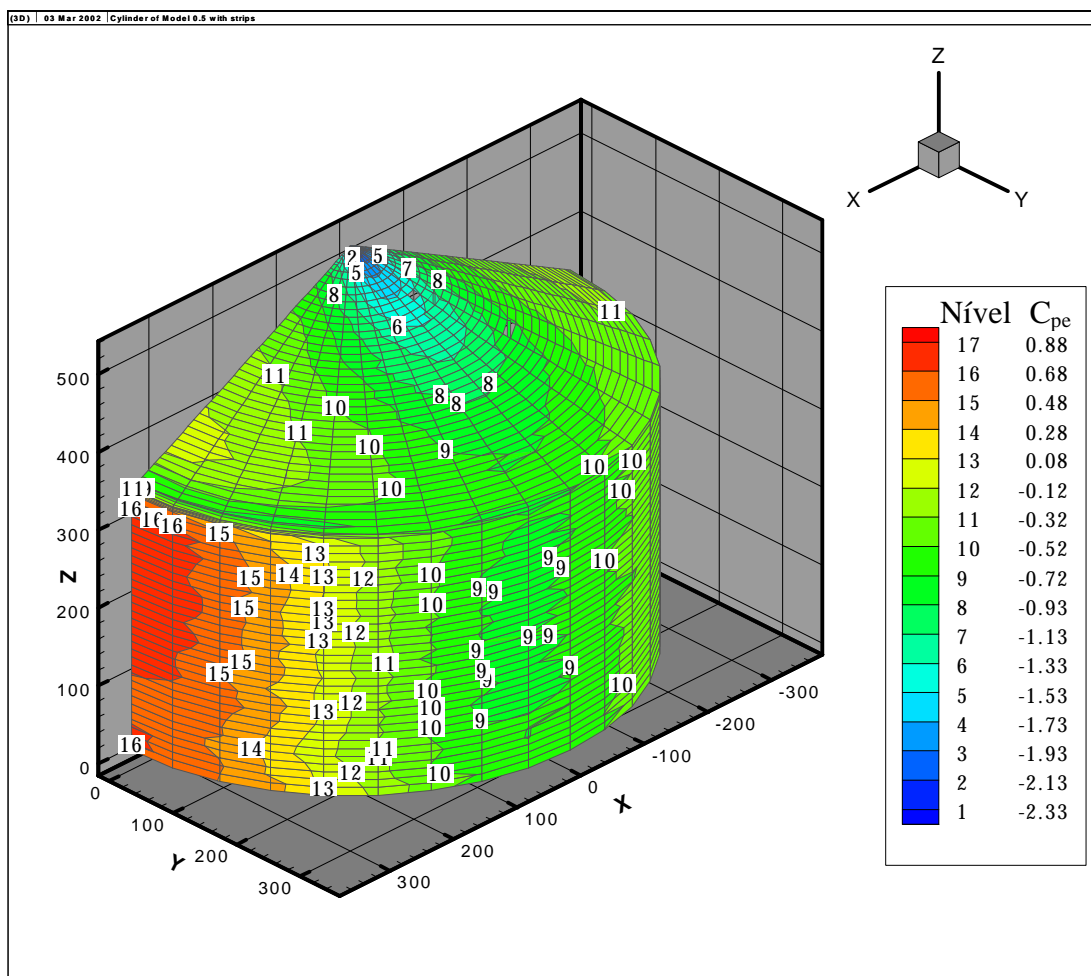
**FIGURA 41 – Modelo rígido 0,5 com elementos externos**

Nas figuras 42 e 43 estão apresentadas as isobáricas dos coeficientes de pressão externa,  $C_{pe}$ , para o modelo 0,5 em perspectiva com superfície lisa e com elementos externos, respectivamente, observando-se que os valores na face a barlavento são positivos e indicados a partir do nível 13 ao 17, e as coordenadas x, y, z estão em milímetros.



**FIGURA 42 –  $C_{pe}$  para o modelo 0,5 com superfície lisa; perspectiva**

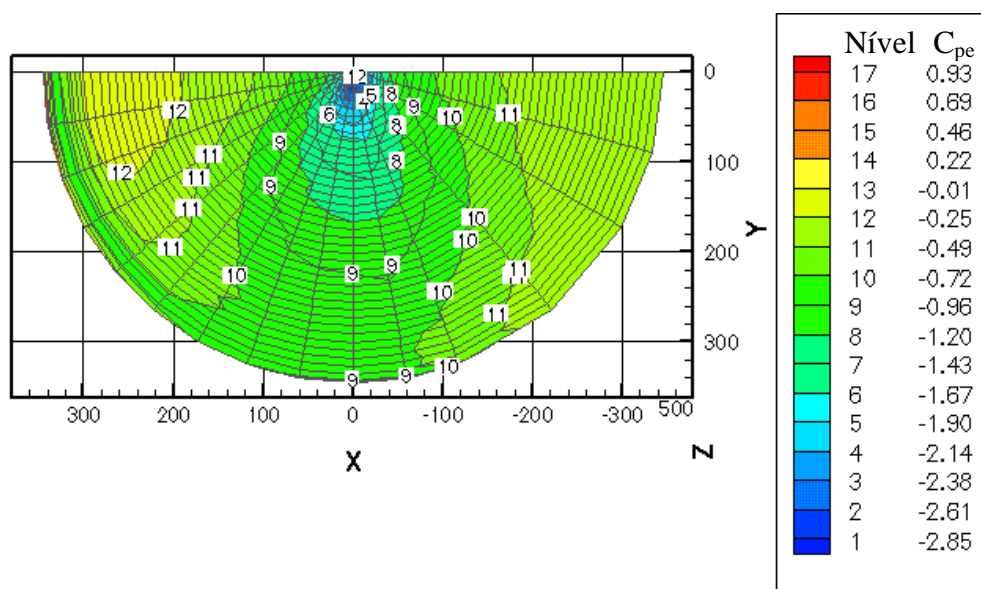
Observe-se que, na região de pressões positivas, há uma descontinuidade dos  $C_{pe}$ , entre  $30 \text{ mm} \leq z \leq 70 \text{ mm}$ . Isto se deve a um vórtice na base que, conseqüentemente, provoca um alívio das pressões.



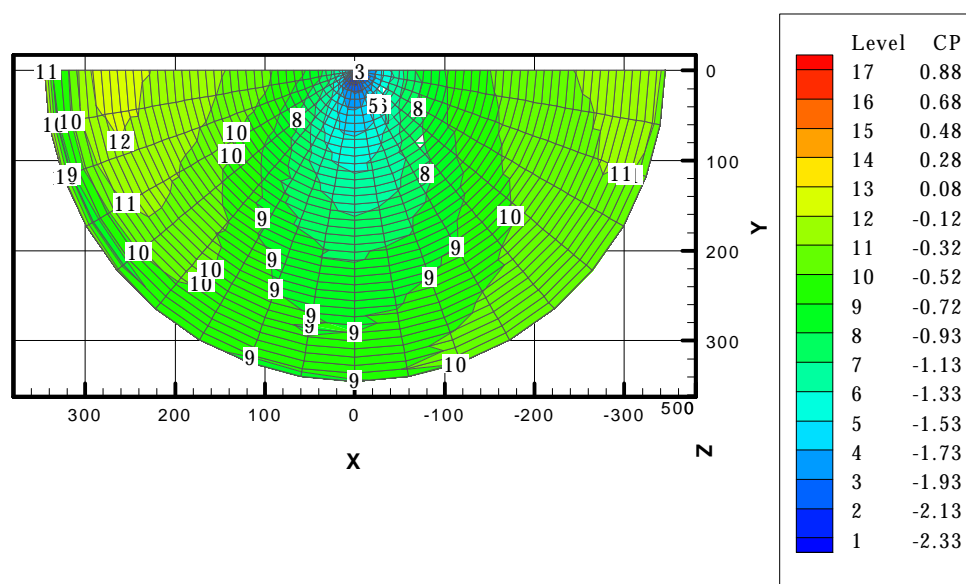
**FIGURA 43 – CP para o modelo 0,5 com elementos externos; perspectiva**

Observe-se que o vórtice de base se mantém, mesmo com o posicionamento das colunas. Além disto, cabe observar que o seu efeito de alívio de pressões se estendeu até 100 mm de altura, contra os 70 mm no modelo liso.

Nas figuras 44 e 45 são apresentadas as isobáricas dos coeficientes de pressão na cobertura do modelo 0,5 com superfície lisa e com elementos externos, respectivamente. A cobertura é vista de cima, com os valores das coordenadas x, y em milímetros.



**FIGURA 44 –  $C_{pe}$  para o modelo 0,5 com superfície lisa; vista xy da cobertura**



**FIGURA 45 –  $C_{pe}$  para o modelo 0,5 com elementos externos; vista xy da cobertura**

Nas figuras 46 e 47 são apresentadas as vistas posterior (sotavento) e anterior (barlavento) das isobáricas dos  $C_{pe}$  do modelo 0,5 para a superfície lisa e com elementos externos, respectivamente.

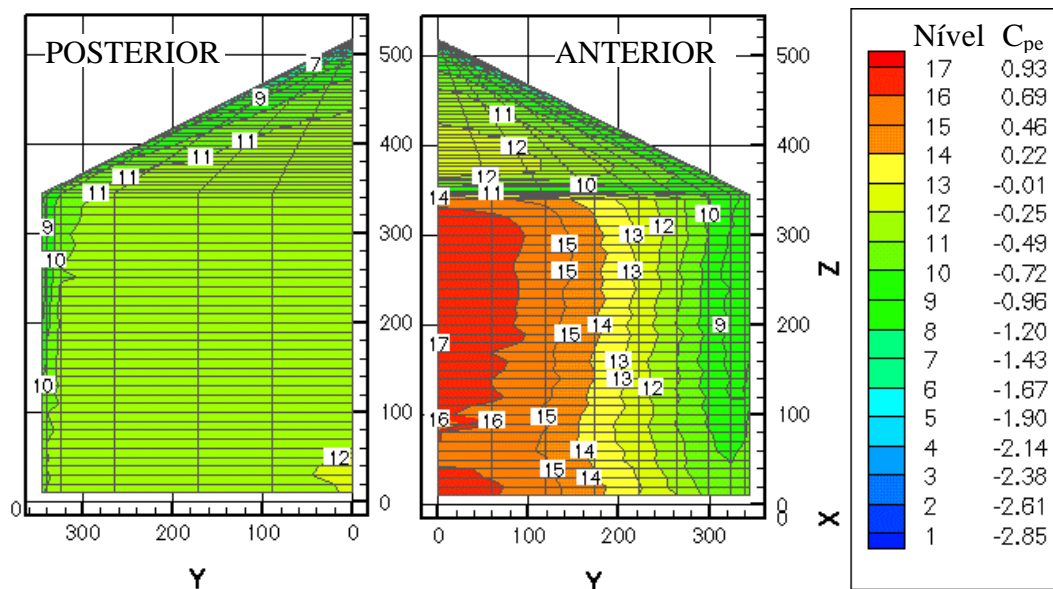


FIGURA 46 –  $C_{pe}$  para o modelo 0,5 com superfície lisa; vista elevada yz

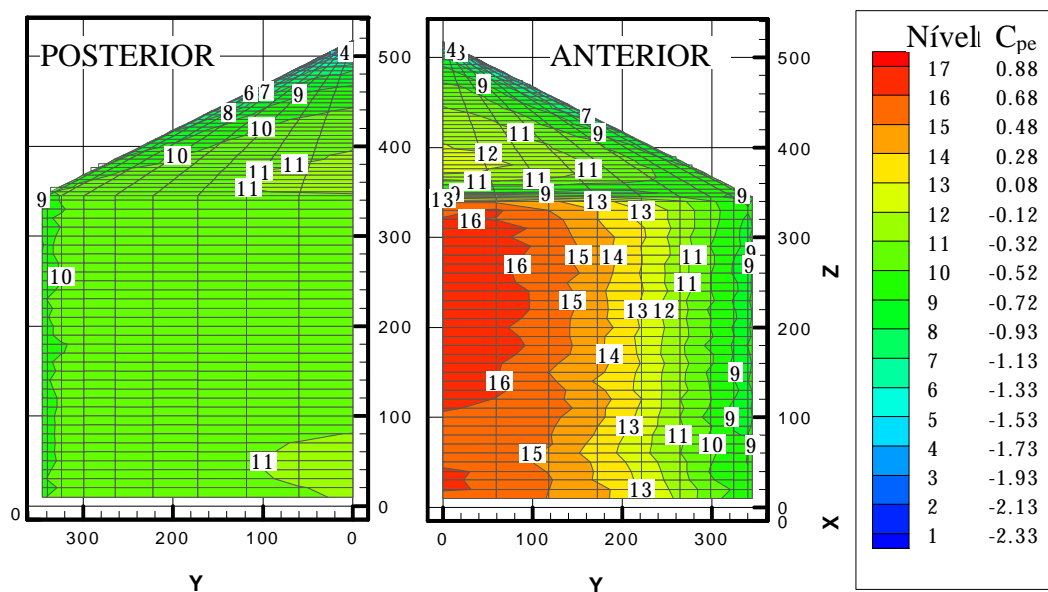
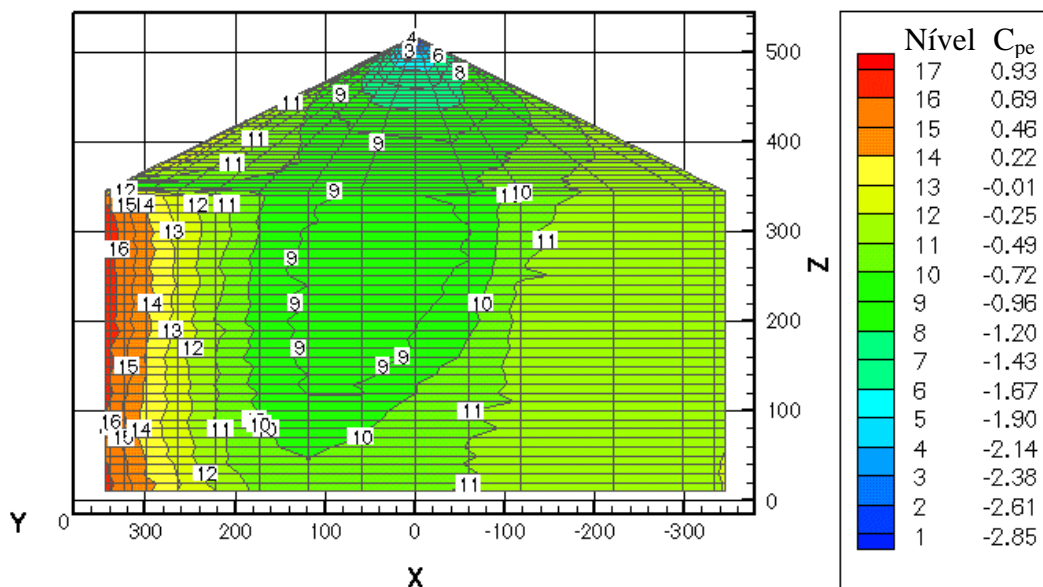


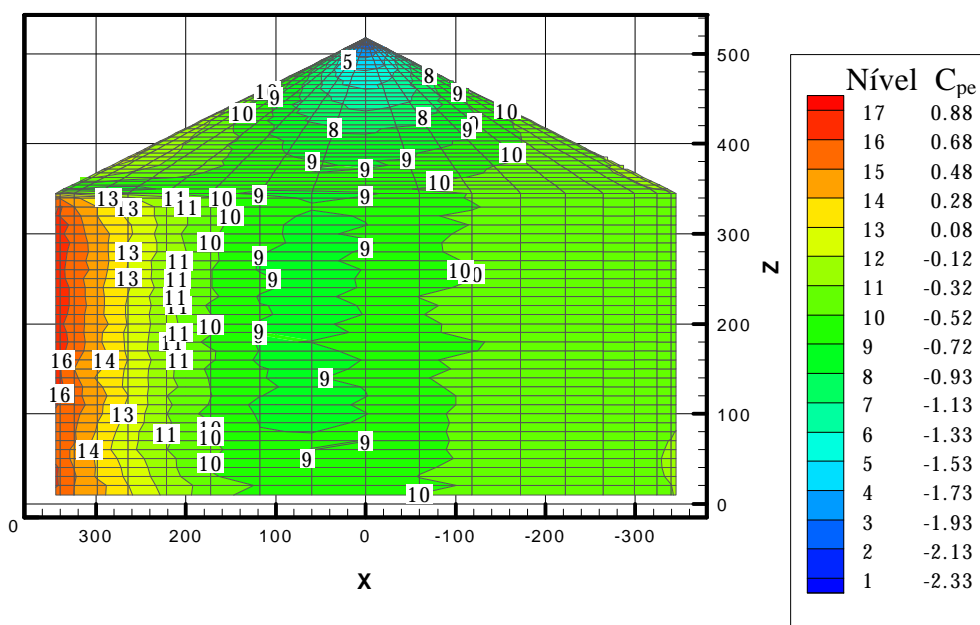
FIGURA 47 -  $C_{pe}$  para o modelo 0,5 com elementos externos; vista elevada yz



Nas figuras 48 e 49 estão apresentadas as vistas laterais (rotação de 90° em relação à face a barlavento) das isobáricas dos  $C_{pe}$  do modelo 0,5 com superfícies lisa e com elementos externos, respectivamente.



**FIGURA 48 –  $C_{pe}$  para o modelo 0,5 com superfície lisa; vista elevada xz**



**FIGURA 49 –  $C_{pe}$  para o modelo 0,5 com elementos externos; vista elevada xz**



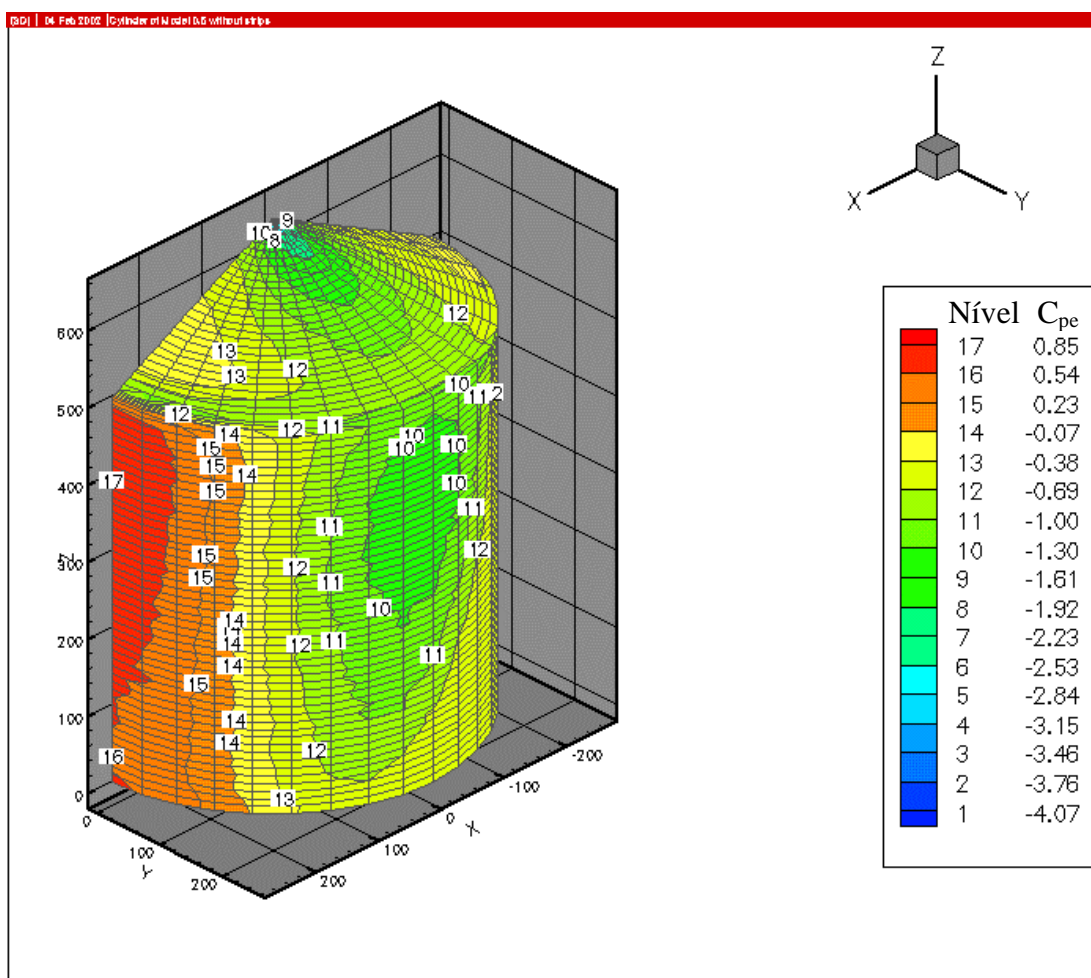
### 5.2.2. Coeficientes de pressão para o modelo 1,0

Os coeficientes de pressão externa para o modelo 1,0 são apresentados para o modelo com a superfície lisa e com os elementos externos – colunas no cilindro e fios na cobertura cônica. A figura 48 mostra o modelo 1,0 com os elementos externos; a superfície lisa é o mesmo modelo, mas sem as colunas e os fios.



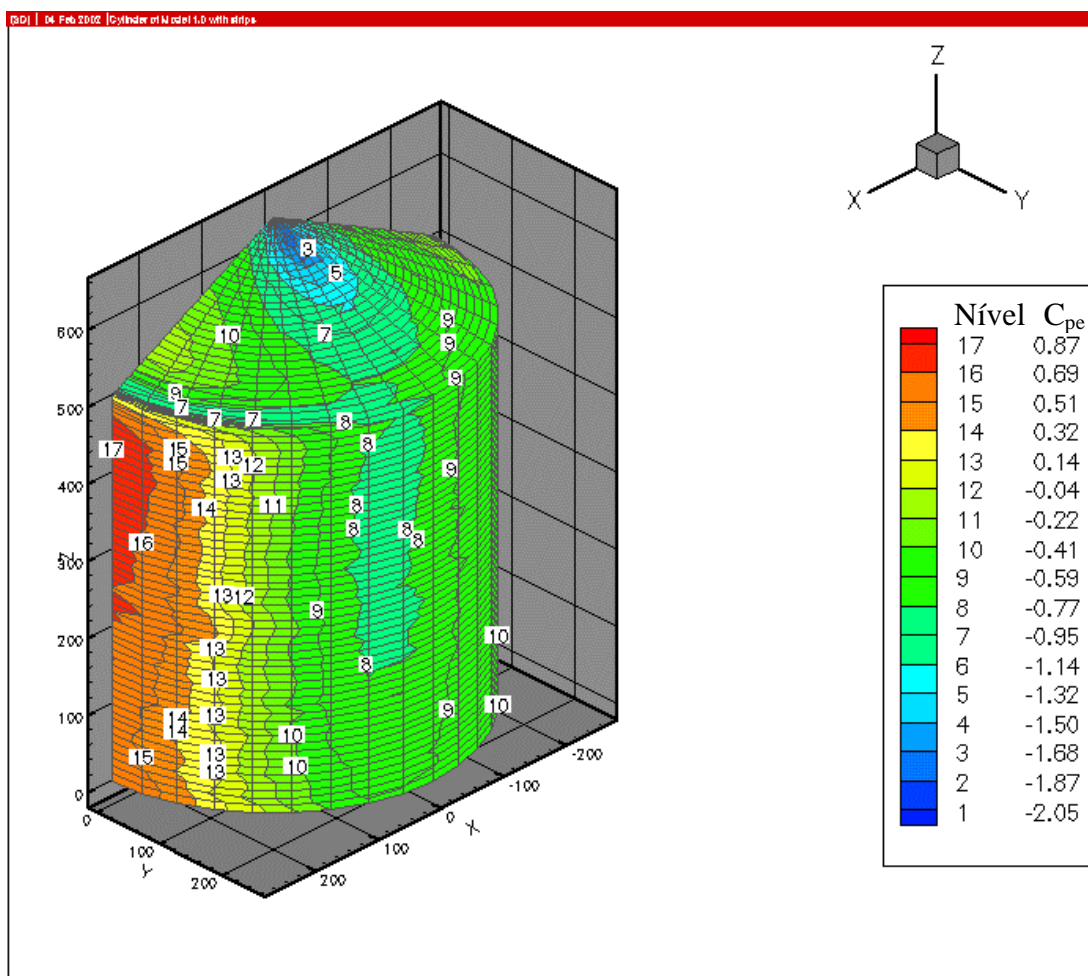
**FIGURA 50 – Modelo rígido 1,0 com elementos externos**

Nas figuras 51 e 52 estão apresentadas as isobáricas dos coeficientes de pressão,  $C_{pe}$ , para o modelo 1,0 em perspectiva com superfície lisa e com elementos externos, respectivamente, observando-se que os valores na face a barlavento são positivos e indicados a partir do nível 14 ao 17 no modelo liso, e a partir do 12 ao 17 no modelo com elementos externos, e as coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  estão em milímetros.



**FIGURA 51 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com superfície lisa; perspectiva**

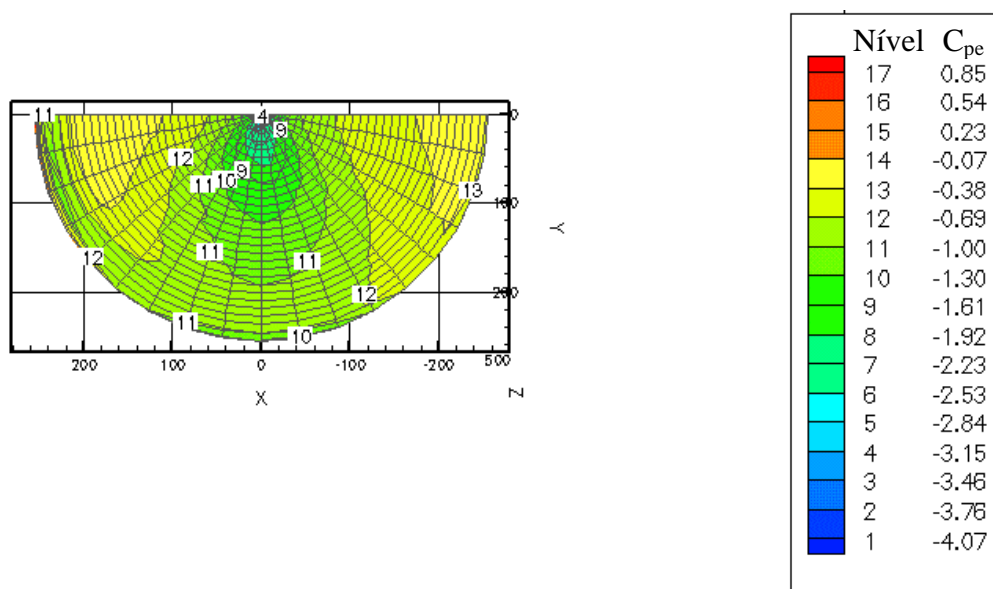
Observe-se que, na região de pressões positivas, há uma descontinuidade dos  $C_{pe}$  indicados pela região em vermelho, entre  $10 \text{ mm} \leq z \leq 70 \text{ mm}$ . Isto se deve a um vórtice na base que, conseqüentemente, provoca um alívio das pressões.



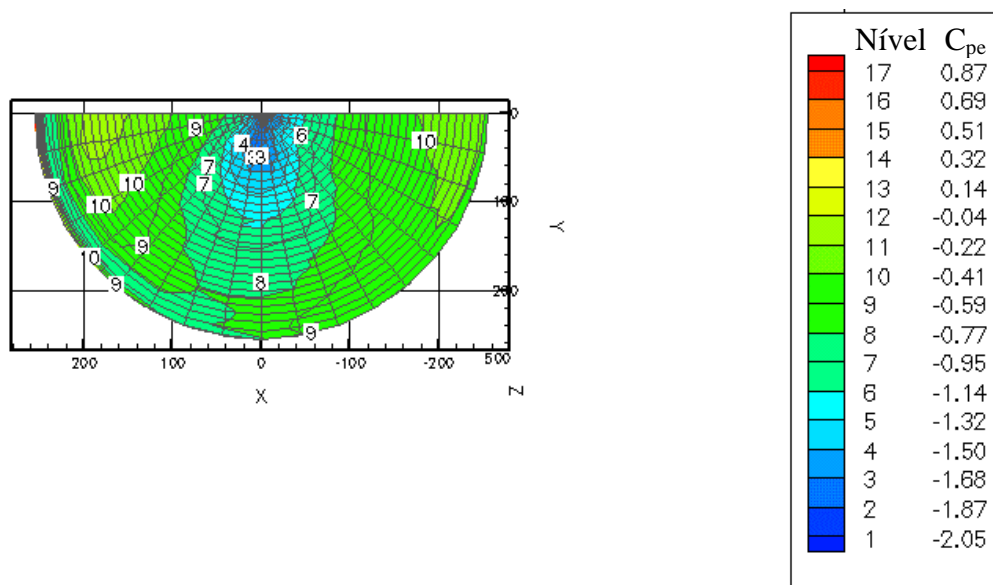
**FIGURA 52 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com elementos externos; perspectiva**

Observe-se que o vórtice na base do cilindro se mantém, mesmo com as colunas. Além disto, cabe observar que o seu efeito de alívio de pressões é percebido porque há uma diminuição dos  $C_{pe}$  entre  $30 \text{ mm} \leq z \leq 100 \text{ mm}$ , embora este efeito não chegue a ocasionar uma descontinuidade da região em vermelho.

Nas figuras 53 e 54 são apresentados os coeficientes de pressão na cobertura do modelo 1,0 com superfície lisa e com elementos externos, respectivamente. A vista da cobertura é em planta, com os valores das coordenadas x, y em milímetros.



**FIGURA 53 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com superfície lisa; vista xy da cobertura**



**FIGURA 54 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com elementos externos; vista xy da cobertura**

Nas figuras 55 e 56 são apresentadas as vistas posterior (sotavento) e anterior dos  $C_{pe}$  do modelo 1,0 à superfície lisa e com elementos externos, respectivamente.

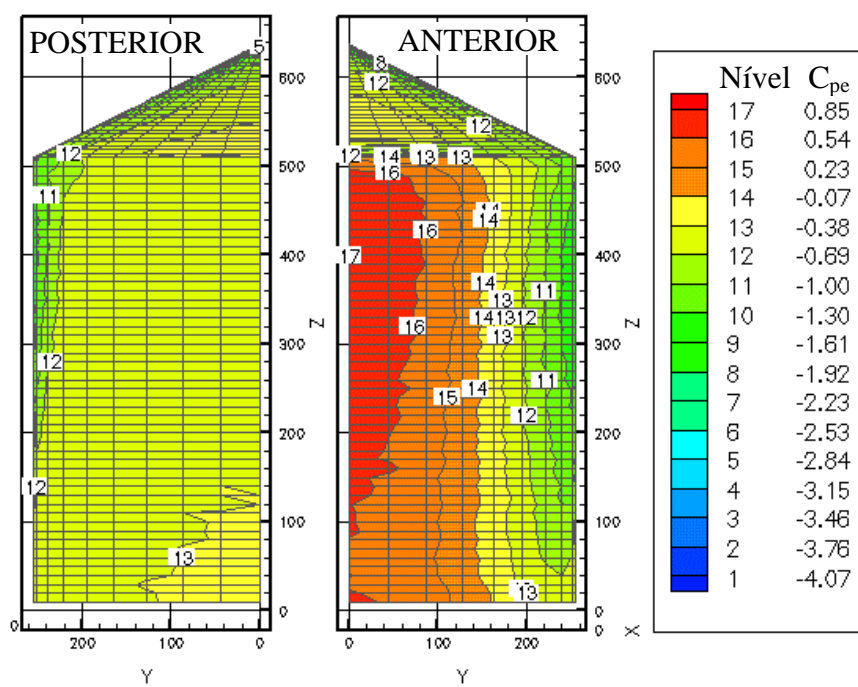


FIGURA 55 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com superfície lisa; vista elevada yz

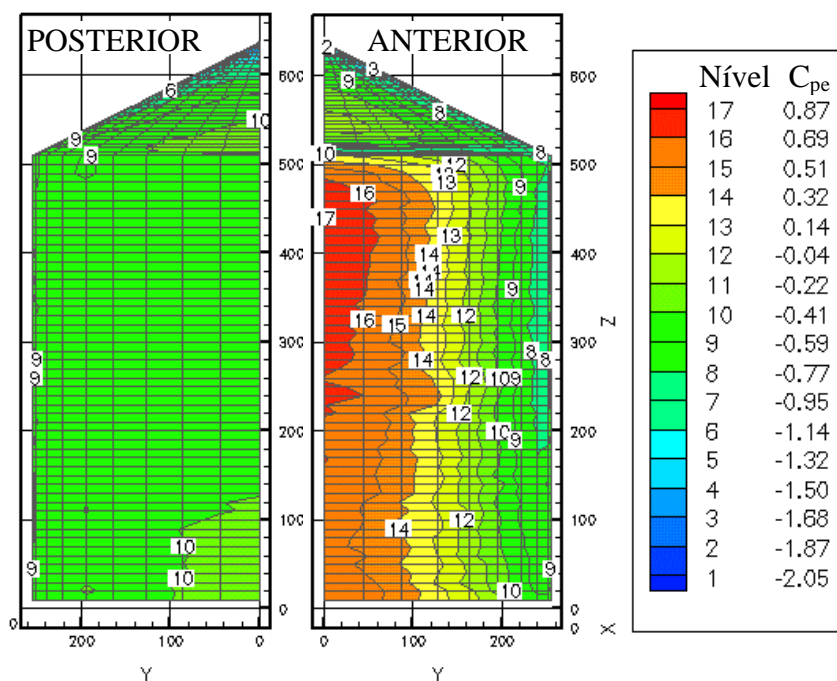


FIGURA 56 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com elementos externos; vista elevada yz

Nas figuras 57 e 58 são apresentadas as vistas laterais dos  $C_{pe}$  do modelo 1,0 à superfície lisa e com elementos externos, respectivamente.

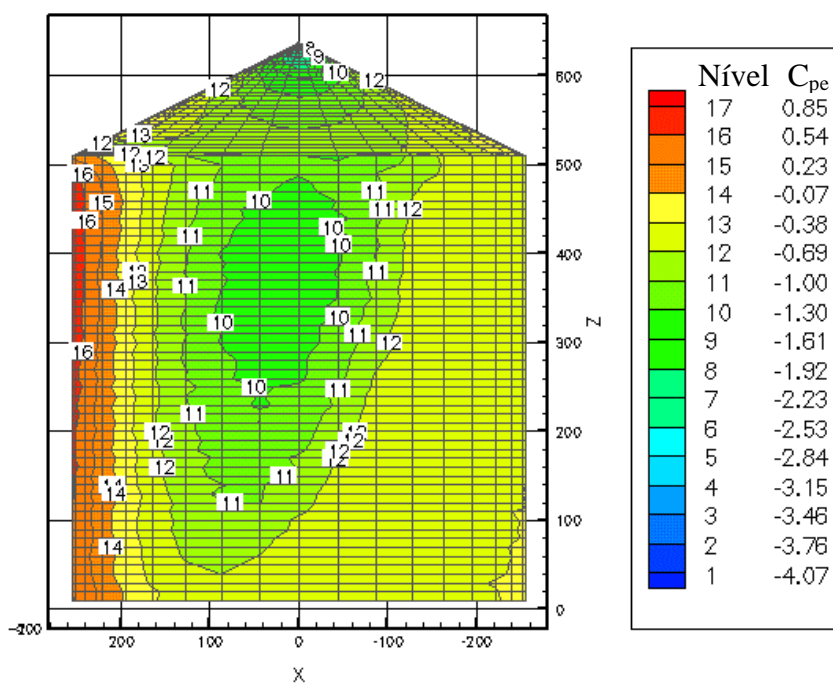


FIGURA 57 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com superfície lisa; vista elevada xz

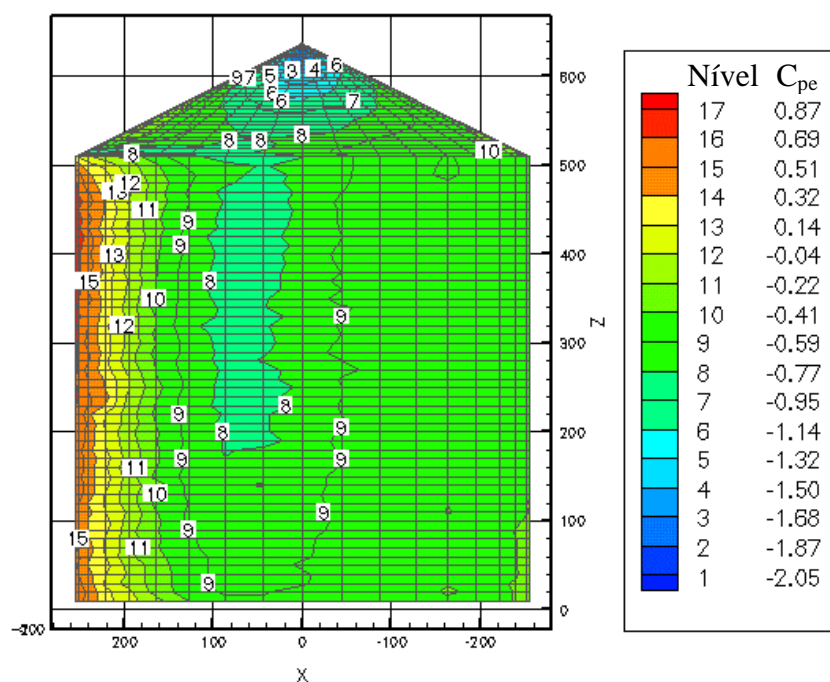


FIGURA 58 –  $C_{pe}$  para o modelo 1,0 com elementos externos; vista elevada xz

### 5.2.3. Coeficientes de arrasto e de sustentação para os modelos rígidos

Como está discutido nos fundamentos, a resistência de forma é preponderante nos corpos rombudos, ou seja, ela é praticamente igual à resistência global do corpo ao escoamento do ar. Deste modo, o cálculo dos coeficientes de arrasto,  $C_a$ , e de sustentação,  $C_s$ , é mais adequado pela integração dos coeficientes de pressão.

Os coeficientes  $C_a$  e  $C_s$  foram calculados para os modelos 0,5 e 1,0 a partir da integração dos valores dos  $C_{pe}$  na superfície dos modelos. O coeficiente  $C_a$  é a resultante dos componentes de  $C_{pe}$  na direção do vento, vezes a área projetada do cilindro ( $H \times D$ ) ou da cobertura ( $D \times b/2$ ). O coeficiente  $C_s$  é a resultante dos componentes dos  $C_{pe}$  na direção perpendicular à do vento, vezes a área projetada da cobertura ( $\pi \times D^2/4$ ).

A tabela 20 traz os valores de  $C_a$  com  $U_{ref}$  à altura  $H$ , de  $C_s$  com  $U_{ref}$  à altura  $H+b$ , e dos números de Reynolds para as velocidades medidas às alturas  $H$  correspondentes aos modelos. Os valores positivos de  $C_a$  indicam força de arrasto na direção do vento e  $C_s$  negativo indica força vertical com sentido para cima.

**TABELA 20 – Coeficientes de arrasto e de sustentação dos modelos**

Modelo H/D	Superfície	$U_{ref}$ , m/s		$C_a$ , NBR	$C_a$	$C_a$	$C_s$	$Re$
		Cil.	Cob.	Cilindro	Cilindro	Cobertura	Cobertura	
0,5	Lisa	15,58	17,50	0,50	0,51	-0,021	-0,55	$7,36 \times 10^5$
0,5	Elementos			0,70	0,61	0,033	-0,50	
1,0	Lisa	17,60	18,90	0,50	0,45	-0,030	-0,74	$6,14 \times 10^5$
1,0	Elementos			0,70	0,56	-0,019	-0,66	

Comparando-se os valores de  $C_a$  com a literatura, observa-se que o valor obtido por SABRANSKY & MELBOURNE (1987) para um cilindro liso de  $H/D = 0,66$ ,  $Re = 1,5 \times 10^5$  e cobertura cônica é cerca de 36% menor que o valor 0,51 obtido para o modelo 0,5 liso. Contudo, a NBR 6123 (1990) fornece um  $C_a = 0,50$  para um cilindro liso,  $Re \geq 4,2 \times 10^5$  e  $H/D = 0,5$ . Portanto, o valor 0,51 está em conformidade com o valor definido na norma brasileira de ventos.

Para o modelo 0,5 com nervuras, o valor do  $C_a$  da NBR 6123 (1990), para saliências  $0,02D$  é  $0,7$ , enquanto que o valor experimental obtido é igual a  $0,61$  para nervuras de saliências  $0,01D$  para  $0 \leq z/H \leq 0,35$  e  $0,006D$  para  $0,35 \leq z/H \leq 1,0$ . Este valor  $0,61$ , inferior a  $0,7$ , é justificado pelo fato que as relações  $0,01D$  e  $0,006D$  são menores que aquelas definidas pela norma brasileira de ventos.

O modelo 1,0 liso apresenta um  $C_a = 0,45$ , que está em conformidade com o valor  $0,5$  fornecido pela NBR 6123 (1990).

Para o modelo 1,0 com nervuras o  $C_a = 0,56$  é inferior ao  $0,7$  fornecido pela norma brasileira. Contudo, este valor está próximo àquele obtido por PRIS (1960) e igual a  $0,61$  para um cilindro de  $H/D = 1,3$  sob um  $R_e = 3,0 \times 10^5$ . Ainda assim, o valor  $0,56$  é inferior ao da norma brasileira pois a relação das saliências é  $0,014$  para  $0 \leq z/H < 0,49$  e  $0,008D$  para  $0,49 \leq z/H \leq 1,0$ . É interessante que SABRANSKY & MELBOURNE (1987) para um silo de  $H/D = 1,16$  e liso obtêm um  $C_a = 0,28$ , muito inferior aos sugeridos pela NBR 6123 (1990). É importante informar que, para o cilindro com nervuras, o  $C_a$  foi medido para as velocidades  $9,77$  m/s e  $17,60$  m/s à altura  $H=510$  mm. A variação dos valores foi  $0,01$  em  $0,58$ , ou seja,  $1,72\%$ .

A NBR 6123 (1990) não dispõe dos valores dos  $C_{pe}$  e, conseqüentemente, dos coeficientes de sustentação  $C_s$  para as coberturas cônicas.

Os valores dos  $C_s$  para as coberturas cônicas encontrados na literatura são  $C_s = -0,90$  e  $C_a = -0,13$  de SABRANSKY & MELBOURNE (1987), para um modelo de  $H/D = 1,16$  e cobertura cônica de  $27^\circ$ , de superfície lisa. Contudo, estes valores são muito maiores que  $C_s = -0,55$  e  $C_a = -0,021$  obtidos nos ensaios do modelo 1,0.

A posição de fios nas coberturas dos modelos reduziu o  $C_s$  em  $9\%$  para o modelo 0,5 e em  $11\%$  para o modelo 1,0, e alterações pequenas nos valores dos  $C_a$ .

#### *5.2.4. Visualizações dos escoamentos de ar junto às superfícies dos modelos rígidos*

A visualização dos escoamentos de ar é feita com linhas de seda fixadas às superfícies dos modelos rígidos. Quando o vento sopra, as linhas movimentam-se



conforme o escoamento junto à superfície do modelo. A finalidade é auxiliar na interpretação das distribuições dos  $C_{pe}$ , na identificação das regiões de sucção e dos vórtices de base e onde ocorrem descolamentos do ar da superfície dos modelos.

O vórtice de base surge quando o vento incide perpendicularmente à superfície, seu efeito é tornar a velocidade local, próximo à base, em sentido contrário à do vento incidente. Os vórtices de base saem pelas laterais do corpo, como ilustrado na figura 59, onde podem ser vistas as linhas usadas para a visualização do escoamento de ar na superfície do modelo.



**FIGURA 59 – Vórtices de base**

Os modelos com as linhas afixadas às superfícies foram filmados sob a ação do vento gerado no túnel. As imagens são obtidas nas regiões anterior (a barlavento), lateral, e posterior dos modelos, de modo a permitir a apreciação do escoamento de ar nas regiões de sobrepressão, sucção e de descolamento do ar da superfície.

Os filmes estão documentados no item “Visualização do escoamento de ar nas superfícies dos modelos rígidos de silos”, do Vídeo CD intitulado “Ensaio de Modelos de Corpo Cilíndrico e Cobertura Cônica em Túnel de Camada Limite”.

### 5.2.5. Análise dos resultados para os modelos rígidos

Em primeiro lugar, os resultados dos coeficientes de pressão externa, de arrasto e de sustentação são comparados àqueles obtidos na literatura para as condições semelhantes de relação H/D, primeiro o cilindro e depois a cobertura, indicando-se também o número de Reynolds como referência às condições do escoamento. É importante notar que a pressão de referência nos ensaios é a pressão dinâmica do vento para  $z = H$  no cilindro e  $z = H+b$  na cobertura, a menos que seja especificado diferente, como ocorre nas comparações com a NBR 6123 (1990).

Para o corpo cilíndrico do modelo 0,5 com superfície lisa,  $Re = 7,4 \times 10^5$ , o valor médio dos coeficientes de pressão externa,  $C_{pe}$ , para a região a barlavento  $200 \leq z \leq 300$  mm e  $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$  é 0,86 e o máximo é 0,92 a 290 mm. O perfil dos  $C_{pe}$  na linha de estagnação reflete o perfil de velocidade do vento, e sofre influência do beiral da cobertura, uma vez que os  $C_{pe}$  reduzem-se praticamente a zero à medida que estão próximos de  $z = H$ . Este valor é ligeiramente superior ao valor médio de 0,78 revelado por SABRANSKY & MELBOURNE (1987), para  $Re = 1,5 \times 10^5$ , para um modelo com H/D = 0,66 e cobertura com  $27^\circ$ , mas é menor que o valor de MACDONALD et al. (1988), que é de 0,9 para  $Re = 2,5 \times 10^5$  para um modelo com H/D = 0,5 e cobertura com  $25^\circ$ . O valor 0,86 é próximo ao obtido por RESINGER & GEINER (1981), que é 0,8 para um modelo de relação H/D = 0,5 e cobertura plana.

É importante ser observado que a influência da forma da cobertura na distribuição dos  $C_{pe}$  no corpo cilíndrico é muito pequena, conforme é observado em MACDONALD et al. (1988), em que a variação é em torno de 5% para mais no modelo com cobertura plana em relação ao modelo com cobertura cônica a  $25^\circ$ .

A separação do escoamento de ar é indicada pela alteração na distribuição dos  $C_{pe}$ , e na figura 44 ocorre no nível 13 para  $\alpha \cong 38^\circ$ , enquanto que em SABRANSKY & MELBOURNE (1987) em  $\alpha \cong 30^\circ$ , em MACDONALD et al. (1988) em torno de  $40^\circ$ , e em RESINGER & GEINER (1981) em torno de  $37^\circ$ .

As linhas isobáricas em toda a superfície cilíndrica concordam com aquelas de SABRANSKY & MELBOURNE (1987), para um modelo de relação H/D = 0,66

e cobertura a  $27^\circ$ , pressão dinâmica de referência à altura  $H$ , e  $R_e = 1,5 \times 10^5$ . A linha isobárica dos  $C_{pe}$  na região lateral,  $80^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$ , apresenta valores cerca de 13% menores no presente estudo, quando comparados aos valores de SABRANSKY & MELBOURNE (1987). Os  $C_{pe}$  são praticamente iguais àqueles de MACDONALD et. al. (1988) e em RESINGER & GEINER (1981) nas regiões de  $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ , mas são cerca de 15% maiores na região de  $80^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$ , onde apresentam valor médio de -0,96 e máximo de -1,21, atingido a aproximadamente  $0,7H$  e  $80^\circ$ . A partir de  $\alpha = 110^\circ$  ocorre descolamento total do escoamento de ar da superfície cilíndrica do modelo, e os valores dos  $C_{pe}$  permanecem constantes e em torno de 0,4 até  $\alpha = 180^\circ$ .

Particularmente em relação à norma brasileira de ventos, NBR 6123 (1990), a pressão dinâmica  $q$  é definida para uma altura de referência igual a 10,0 m. Isto conduz a um valor máximo de  $C_{pe} = +1,0$ .

Pela figura 58, para o modelo 0,5, os  $C_{pe}$  positivos são praticamente iguais nas condições do cilindro liso ou com nervuras, nos dados dos ensaios e da NBR 6123 (1990). Os valores negativos no cilindro liso são menores que os da norma em  $\theta = 60^\circ$ , em torno de 16%, mas atingem aproximadamente o mesmo valor máximo que é  $C_{pe} = -1,3$  em torno de  $\alpha = 72^\circ$ . Para  $\alpha \geq 140^\circ$ , a norma apresenta  $C_{pe} = -0,25$ , enquanto que os  $C_{pe}$  obtidos são em torno de -0,40. Em relação aos valores positivos não há diferenças, mas para os valores negativos as diferenças são em torno de 10%, para os valores dos  $C_{pe}$  em  $80^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$  e de 60% em  $\alpha > 130^\circ$ .

A região crítica com valores máximos positivos dos  $C_{pe}$  situa-se a cerca de  $0,7 \sim 0,87H$ , sendo em torno de 1,00 para  $\alpha = 0^\circ$ , 0,95 para  $\alpha = 10^\circ$  e 0,70 em  $\alpha = 20^\circ$ , e para 0,33 em  $\alpha = 30^\circ$ , anulando-se em torno de  $\alpha = 38^\circ$ .

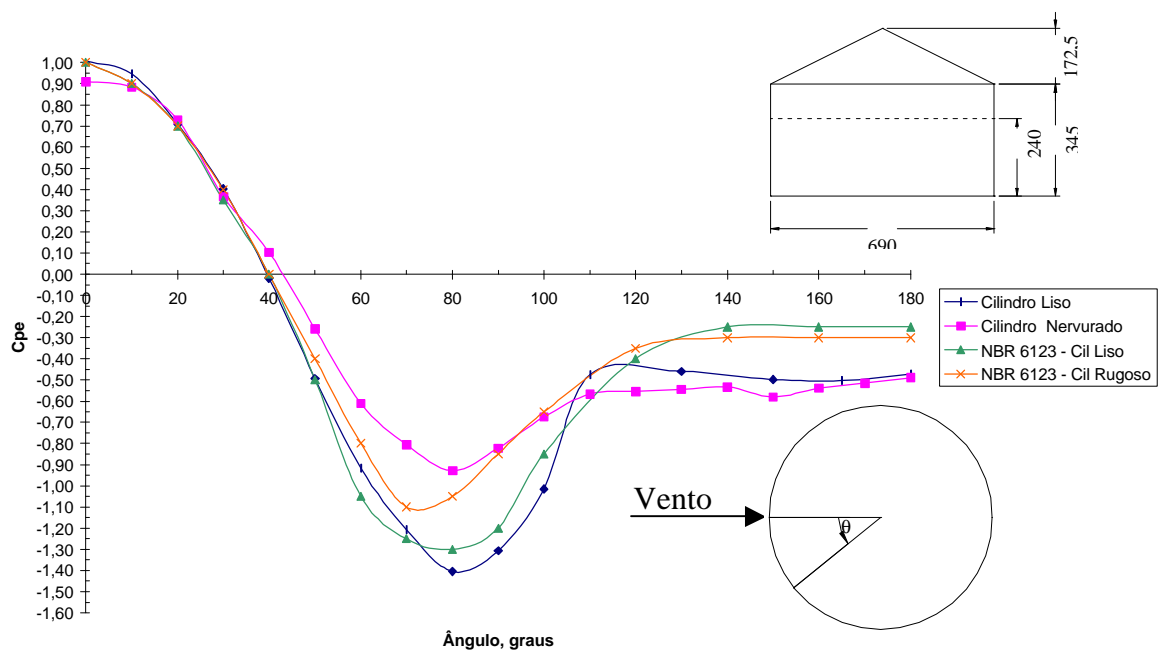
A região crítica de valores absolutos máximos de sucção situa-se em torno de  $\alpha = 80^\circ$ , com valores dos  $C_{pe}$  em torno de -1,24.

Para o modelo 0,5 com elementos externos na superfície cilíndrica, que podem ser chamados nervuras, não há resultados recentes na literatura. Os únicos resultados são mostrados em BLESSMANN (1983) referentes a trabalhos realizados por FLACHSBART (1932), ACKERET (1934) e PRIS (1960). Contudo, estes estudos foram realizados para estruturas com relações  $H/D$  iguais a 1,1, 1,7 e 4,0,

muito diferentes de 0,5. Assim, os resultados obtidos para o cilindro de relação  $H/D=0,5$  com nervuras são analisados em relação ao modelo com superfície lisa.

As linhas isobáricas na região de valores positivos não sofrem alterações significativas devido à adição de nervuras, como pode ser visto pela comparação entre as figuras 44 e 45, nem na configuração nem nos valores. Contudo, observa-se nas figuras 46 e 47 que a região lateral de valores negativos,  $80^\circ \leq \mathbf{q} \leq 100^\circ$ , apresenta reduções consideráveis do valor absoluto do  $C_{pe}$ , em torno de 25%. Entretanto, para a região  $\mathbf{q} \geq 110^\circ$ , os valores dos  $C_{pe}$  aumentaram de 0,4 para 0,5, alcançando o valor 0,4 próximo a  $\mathbf{q} = 180^\circ$ . A distribuição dos  $C_{pe}$  mostrada na NBR 6123 (1990) para cilindro com superfície rugosa ou com saliências é diferente da obtida com as nervuras externas, que apresenta uma redução muito mais acentuada na lateral do cilindro, em torno de 30%. As diferenças nos  $C_{pe}$  que ocorrem para  $\mathbf{q} > 110^\circ$  são em torno de 60% em relação aos valores da norma, mas isto não é prejudicial ao comportamento do cilindro porque está a sotavento.

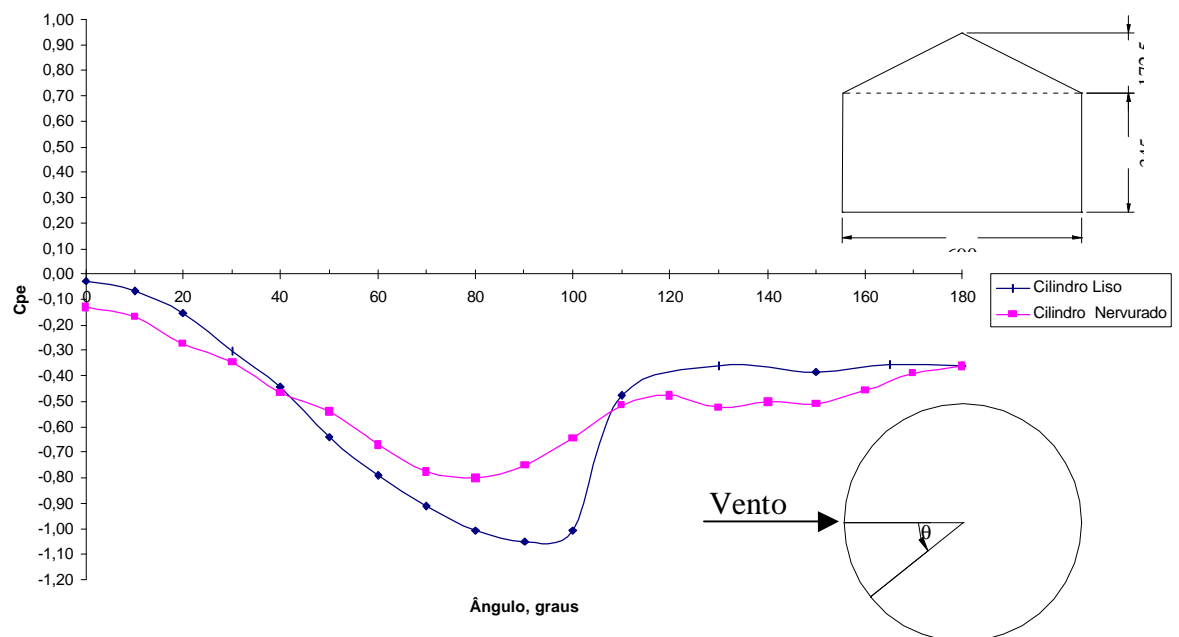
A figura 58 ilustra esta análise e traz também os valores da NBR 6123 (1990) para a condição  $H/D < 2,5$ , superfícies lisa e rugosa,  $Re > 4,2 \times 10^5$ .



**FIGURA 60 –  $C_{pe}$  no cilindro do modelo 0,5 - tomadas de pressão a  $z/H = 0,70$**

No modelo de relação  $H/D = 0,5$  a cobertura cônica com fios apresenta uma redução considerável dos  $C_{pe}$  em comparação à de superfície lisa, em torno de 25% para os níveis 8, 9, 10 e 11 até 48% para o nível 12. Na região próxima ao ápice da cobertura, para os níveis de 1 a 6, a redução ficou em torno de 18%.

O modelo 0,5 com superfície lisa apresenta valores dos  $C_{pe}$  de  $-0,90$  a  $-1,05$  na região do beiral de  $70^\circ$  até  $90^\circ$ , que diminuem em valor absoluto a partir de  $100^\circ$  até  $130^\circ$ , quando atingem  $-0,35$ , valor que praticamente se mantém até  $180^\circ$ . O modelo 0,5 com elementos externos apresenta uma sucção no beiral de  $0^\circ$  a  $20^\circ$  ligeiramente maior, de  $-0,1$  a  $-0,28$ , em relação ao de superfície lisa, mas reduz-se muito na região de  $50^\circ$  a  $100^\circ$ , em torno de 30%, conforme a figura 61.



**FIGURA 61 –  $C_{pe}$  dos modelos 0,5 - tomadas de pressão em  $z/H = 1,0$**

A cobertura lisa do modelo 0,5 apresenta valores dos  $C_{pe}$  na região logo acima ao beiral com média igual a  $-0,85$ , que é próximo à média  $-0,9$  obtida por SABRANSKY & MELBOURNE (1987), para um cilindro de relação  $H/D=0,66$ , cobertura de  $27^\circ$ ,  $R_e = 1,5 \times 10^5$ . As linhas isobáricas são semelhantes entre os dois trabalhos, e com valores próximos entre si. A região de descolamento completo do escoamento é  $\theta \cong 140^\circ$  da região a barlavento, indicada pelo nível 11 na figura 44.

A cobertura com fios do modelo 0,5 apresenta valores dos  $C_{pe}$  na região logo acima ao beiral com média igual a -0,70, ou seja, uma redução de 18% em relação à cobertura lisa. A região de descolamento completo do escoamento é  $q \cong 140^\circ$  da região a barlavento, indicada pelo nível 11 na figura 45.

Para o corpo cilíndrico do modelo 1,0 com superfície lisa,  $Re = 6,1 \times 10^5$ , o valor médio dos coeficientes de pressão externa,  $C_{pe}$ , para a região a barlavento  $310 \leq z \leq 460$  mm e  $0^\circ \leq q \leq 10^\circ$  é 0,79 com um máximo de 0,85 a 400 mm. O perfil dos  $C_{pe}$  na linha de estagnação reflete o perfil de velocidade do vento incidente, e sofre influência do beiral da cobertura, uma vez que os  $C_{pe}$  reduzem-se a 0,1 à medida que estão próximos de  $z = H$ . Este valor  $C_{pe} = 0,79$  é próximo ao valor médio 0,81 revelado por SABRANSKY & MELBOURNE (1987), para  $Re = 1,0 \times 10^5$ , em um modelo com  $H/D = 1,16$  e cobertura com  $27^\circ$ , mas é menor que o valor de MACDONALD et al. (1988), que é de 0,85 para  $Re = 2,9 \times 10^5$  em um modelo com  $H/D = 1,0$  e cobertura com  $25^\circ$ . O valor 0,79 é menor que o obtido por RESINGER & GEINER (1981), que é 0,85 para um modelo de  $H/D = 1,0$  e cobertura em cúpula.

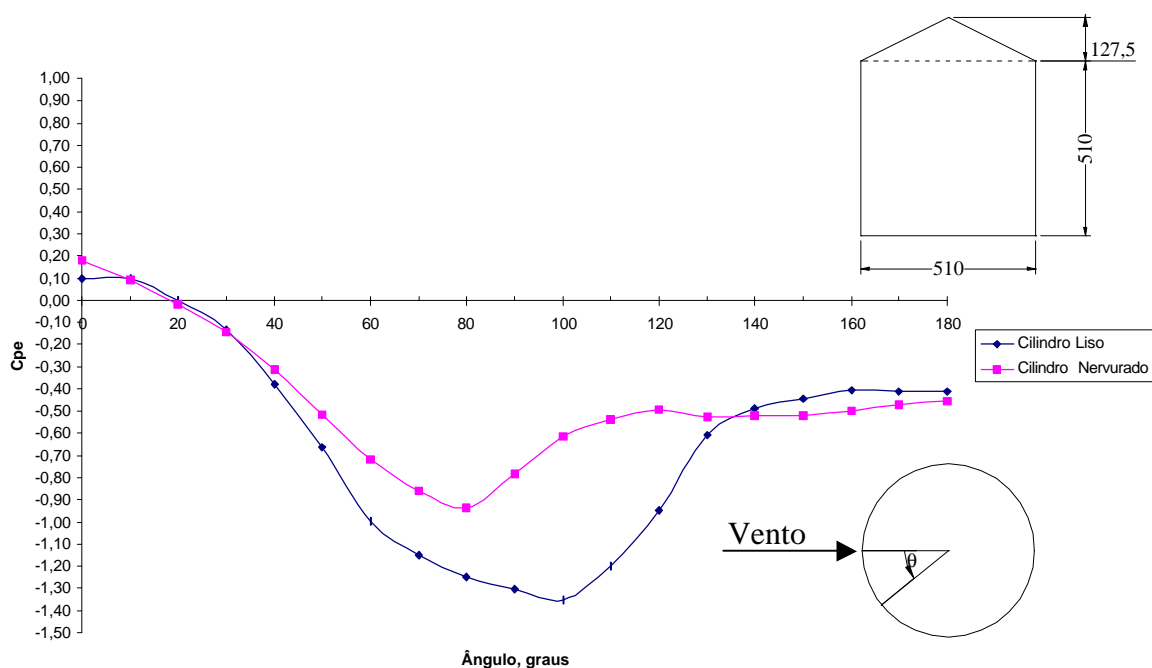
A separação do escoamento de ar ocorreu para  $q \cong 35^\circ$ , valor igual aos obtidos por SABRANSKY & MELBOURNE (1987) e RESINGER & GEINER (1981), mas ligeiramente menor que o valor  $q \cong 38^\circ$ , obtido por MACDONALD et al. (1988).

As linhas isobáricas em toda a superfície cilíndrica concordam com aquelas de SABRANSKY & MELBOURNE (1987), para um modelo de relação  $H/D = 1,16$  e cobertura a  $27^\circ$ , pressão dinâmica de referência à altura  $H$ , e  $Re = 1,0 \times 10^5$ . Os valores dos  $C_{pe}$  são praticamente iguais em toda o perímetro em comparação com aqueles obtidos por SABRANSKY & MELBOURNE (1987), MACDONALD et al. (1988) e RESINGER & GEINER (1981).

A região crítica com valores máximos positivos dos  $C_{pe}$  situa-se a cerca de 0,6~0,9H, sendo em torno de 0,8 para  $q = 0^\circ$ , 0,7 para  $q = 10^\circ$ , 0,5 para  $q = 20^\circ$  e 0,19 para  $q = 30^\circ$ , anulando-se em torno de  $q = 35^\circ$ . A região crítica de valores máximos de sucção situa-se em torno de  $q = 80^\circ$ , com valores dos  $C_{pe}$  em torno de -1,45.

O modelo 1,0 com superfície lisa apresenta valores dos  $C_{pe}$  positivos iguais a 0,10 de  $0^\circ$  a  $10^\circ$ , 0 em  $20^\circ$ , e que diminuem gradualmente até atingir um  $C_{pe}$  mínimo

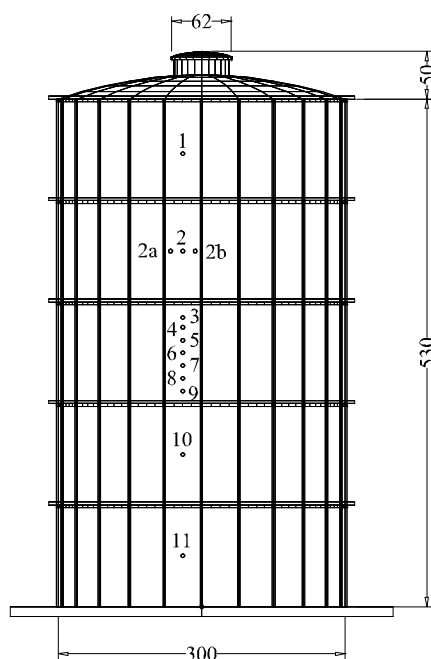
(ou máximo em sucção) em torno de  $-1,3$  de  $80^\circ$  a  $100^\circ$ , que aumentam novamente a partir de  $100^\circ$  até  $160^\circ$ , quando atingem em torno de  $-0,4$ , valor que se mantém até  $180^\circ$ . O modelo com elementos externos apresentou uma região de  $C_{pe}$  com valores  $0,18$  em  $0^\circ$  e  $0,1$  em  $10^\circ$ ,  $0$  em  $20^\circ$ , e que diminuem gradualmente até atingir um  $C_{pe}$  mínimo igual a  $-0,94$  em  $80^\circ$ , que aumentam novamente a partir de  $80^\circ$  até  $120^\circ$ , quando atingem em torno de  $-0,50$ , valor que se mantém até  $180^\circ$ .



**FIGURA 62 -  $C_{pe}$  dos modelos 1,0 - tomadas de pressão em  $z = 510$  mm**

Para o modelo 1,0 com elementos externos na superfície cilíndrica, que podem ser chamados nervuras, os resultados da literatura que podem ser comparados são para estruturas com relações  $H/D$  iguais a 1,1, 1,7 e 1,3, obtidos por FLACHSBART (1932), ACKERET (1934) e PRIS (1960), respectivamente. Os dados referentes a estes trabalhos foram extraídos de BLESSMANN (1981).

O modelo ensaiado por FLACHSBART (1932) tinha relação  $H/D=1,73$ , em escala 1:130, com 24 nervuras verticais, 5 nervuras horizontais, com saliências iguais a 2 e 10 mm, respectivamente, como indicado na figura 61. É importante notar-se que as nervuras verticais estão posicionadas a  $15^\circ$ , enquanto que no modelo 1,0 este valor é  $10^\circ$ . Os resultados obtidos por FLACHSBART (1932) foram praticamente iguais para os dois números de Reynolds  $4,2 \times 10^5$  e  $7,2 \times 10^5$  usados nos ensaios.



**FIGURA 63 – Modelo cilíndrico nervurado, H/D=1,73 (FLACHSBART 1932)**

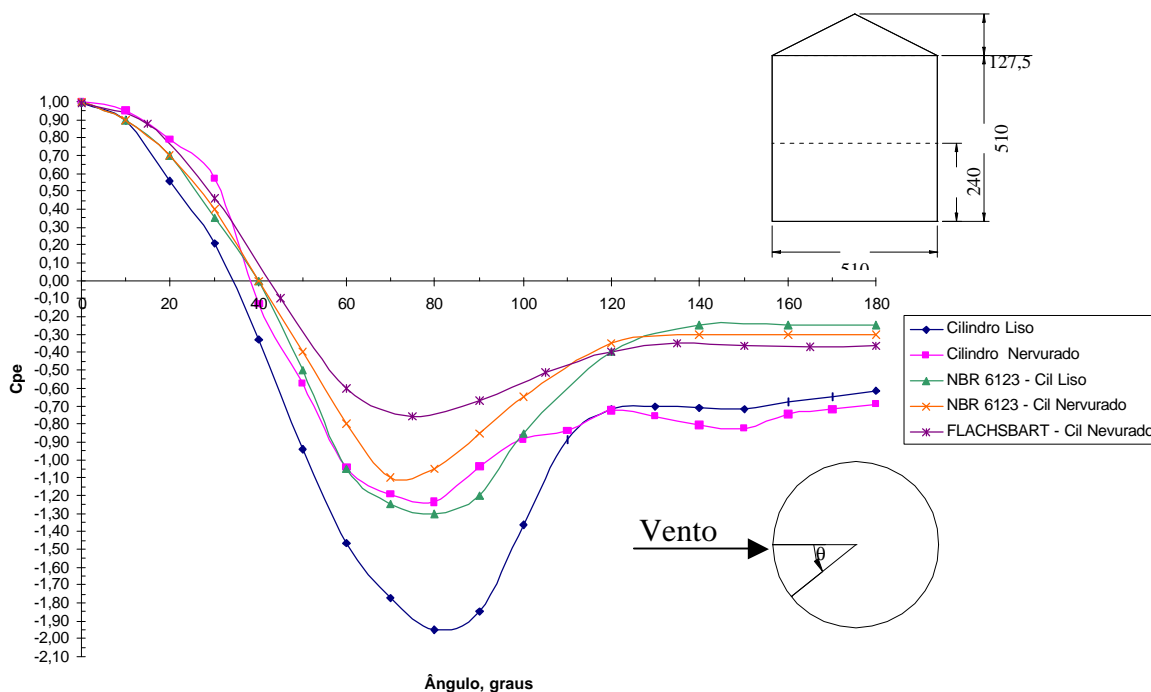
A influência das nervuras horizontais pode ser avaliada a partir dos valores fornecidos por FLACHSBART (1932), reproduzidos na tabela 21, da qual se deduz que a variação é muito pequena e certamente devida à variação de altura.

**TABELA 21 – Valores dos  $C_{pe}$  no cilindro nervurado (FLACHSBART 1932)**

Ângulo	Tomada						
	3	4	5	6	7	8	9
0°	+0,99	+0,99	+0,99	+0,98	+1,00	+1,00	+1,00
15°	+0,88	+0,87	+0,86	+0,86	+0,86	+0,87	+0,80
30°	+0,46	+0,45	+0,52	+0,54	+0,54	+0,54	+0,48
45°	-0,10	-0,11	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,07
60°	-0,60	-0,55	-0,50	-0,46	-0,49	-0,58	-0,61
75°	-0,76	-0,73	-0,69	-0,68	-0,70	-0,76	-0,73
90°	-0,67	-0,65	-0,64	-0,64	-0,64	-0,65	-0,61
105°	-0,51	-0,54	-0,57	-0,58	-0,56	-0,49	-0,50
120°	-0,40	-0,44	-0,47	-0,45	-0,43	-0,45	-0,46
135°	-0,35	-0,37	-0,39	-0,39	-0,40	-0,43	-0,44
150°	-0,36	-0,38	-0,40	-0,40	-0,42	-0,43	-0,44
165°	-0,37	-0,37	-0,40	-0,40	-0,42	-0,44	-0,46
180°	-0,36	-0,36	-0,39	-0,39	-0,40	-0,42	-0,44



Uma comparação direta entre os valores obtidos por FLACHSBART (1932) e os resultados deste trabalho não seria adequada devido à diferença entre as relações  $H/D$ . Contudo, é importante o fato que os valores dos  $C_{pe}$  obtidos nas tomadas de pressão 2a e 2b variaram pouco na região de sobrepressão, em conformidade com os resultados mostrados nas figuras 55 e 56. Os valores das sucções laterais foram reduzidos devido às nervuras verticais em pelo menos metade dos valores obtidos para um modelo de superfície lisa, como indicado por BLESSMANN (1983). No presente estudo, os valores da sucção para o modelo com nervuras, comparado ao de superfície lisa, foram reduzidos em torno de 30% na lateral do cilindro com  $H/D=0,5$  e, para o modelo 1,0, em torno de 40%, como indicado nas figuras 60 e 64, respectivamente. Comparando-se o aumento da relação  $H/D$  do modelo 0,5 para o modelo 1,0, a redução nos valores de sucção na lateral do cilindro é muito mais significativa para a relação  $H/D = 1,0$ . Em relação à NBR 6123 (1990) as diferenças nos valores dos  $C_{pe}$  são grandes, principalmente para o cilindro liso. Para o cilindro com nervuras ainda há diferenças, mas os valores estão em conformidade com a norma até  $50^\circ$ , quando começam as diferenças.



**FIGURA 64 -  $C_{pe}$  no cilindro do modelo 1,0 - tomadas de pressão a  $z/H = 0,47$**

O modelo ensaiado por ACKERET (1934) tinha nervuras horizontais e verticais, diâmetro  $D = 552$  mm, altura  $H = 625$  mm,  $H/D = 1,13$ , na escala 1/100 e submetido a  $R_e = 1,2 \times 10^6$ .

O modelo liso de ACKERET (1934) apresentou uma sucção máxima na região próxima a  $\mathbf{q} \cong 90^\circ$  de  $-1,7$  e, para o modelo com nervuras,  $-0,6$  a partir de  $\mathbf{q} \cong 65^\circ$ . Na região onde o escoamento está totalmente descolado,  $\mathbf{q} > 140^\circ$ , o modelo liso apresenta  $-0,45 < C_{pe} < -0,3$  e o modelo com nervuras os valores de  $C_{pe}$  são praticamente uniformes e iguais a  $-0,2$ . No presente estudo, o modelo 1,0 com superfície lisa apresentou um valor de sucção máximo igual a  $-1,45$  em  $\mathbf{q} \cong 90^\circ$  e o modelo com nervuras uma sucção igual  $-0,85$  a  $\mathbf{q} \cong 70^\circ$ .

Os estudos de PRIS (1960) foram realizados em um cilindro com  $H/D = 1,3$ ,  $H = 400$  mm e  $D = 300$  mm, para várias alturas de nervuras,  $h_n$ , 3, 6 e 10 mm, e espessura das nervuras igual a 2 e 6 mm, tal que  $1/50 < h_n/D < 1/10$  e espaçamentos diferentes entre as mesmas, com  $R_e \cong 3,0 \times 10^5$ . No cilindro de  $H/D = 1,3$  foram usadas as nervuras de 2 mm, em número de 18, 36 e 72. As conclusões importantes são que o  $C_a$  é independente da relação de saliência dada por  $h_n/D$ , e do número de nervuras. O valor de  $C_a = 0,60$  no cilindro com  $H/D = 1,3$ .

Na tabela 20 o resultado dos ensaios do modelo com  $H/D = 1,0$  é  $C_a = 0,56$ , considerando-se o diâmetro igual a 510 mm, e  $0,57$  considerando-se o cilindro com o diâmetro aumentado pelas nervuras e igual a 514 mm.

Quando o número de nervuras é baixo, igual a 8, há diferença para o vento incidindo sobre uma nervura mas, a partir de 16 nervuras, a resistência é a mesma com o vento incidindo diretamente sobre ou entre nervuras.

PRIS (1960) também constatou o mesmo que FLACHSBART (1932), ou seja, que as diferenças são pequenas entre as posições das tomadas de pressão mais próximas às nervuras ou no meio de duas. As sucções laterais em PRIS (1960) de  $C_{pe} = -0,6$  são baixas devido às nervuras, contra  $-0,8$  para o modelo 1,0 com nervuras e  $-0,5$  para o modelo 1,0 liso, e os valores para  $\mathbf{q} > 100^\circ$  são praticamente uniformes e baixos, em torno de  $-0,25$ , contra  $-0,40$  do modelo 0,1 com nervuras. O perfil de  $C_{pe}$  médios apresenta a mudança de região de sobrepressão para sucção em  $\mathbf{q} = 42^\circ$ .

### 5.3. Descrição do comportamento do modelo flexível

O modelo flexível foi estudado em dois casos: o primeiro para as forças estáticas aplicadas ao cilindro e o segundo para as forças exercidas pelo vento gerado no túnel. A finalidade é coletar informações sobre as configurações e os valores de deslocamentos estáticos característicos, para servir de base na comparação da ordem de grandeza dos demais deslocamentos devidos à ação do vento.

Os valores dos deslocamentos são medidos em uma área definida por quatro pontos  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  e  $P_6$ , situados a  $\pm 4,5^\circ$  em relação à linha a  $q = 0^\circ$ , e nas cotas  $z = 255$  e  $z = 300$  mm, como indicado nas figuras 65, 66 e 67, respectivamente para as vistas  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ . Observe-se que as figuras trazem o reticulado na posição indeformada do cilindro, e em escala real, ou seja, o lado da quadrícula é igual a 5 mm na região central, que está entre os pontos  $P_1$  e  $P_6$ .

No caso das forças estáticas, aplicadas na coluna 1 a  $q = 0^\circ$ ,  $z = 255$  mm e  $z = 380$  mm, os valores dos deslocamentos são medidos nas mesmas posições das forças com um transdutor, e por imagens em 255 mm e 300 mm. Com os resultados obtidos pelo transdutor são aferidos os valores calculados a partir das imagens.

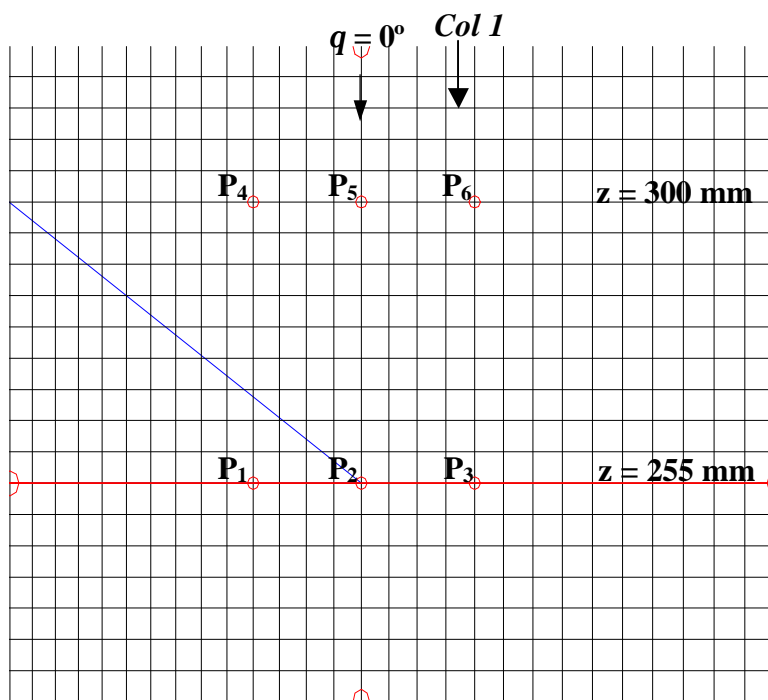


FIGURA 65 - Área característica em foco 1, vista  $V_1$

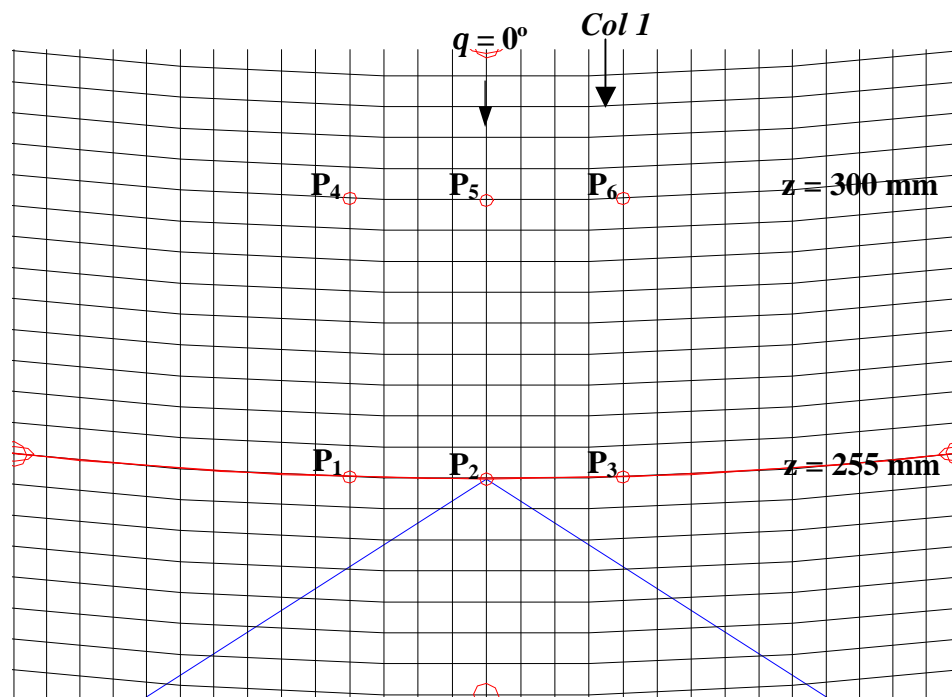


FIGURA 66 - Área característica em foco 1, vista  $V_2$

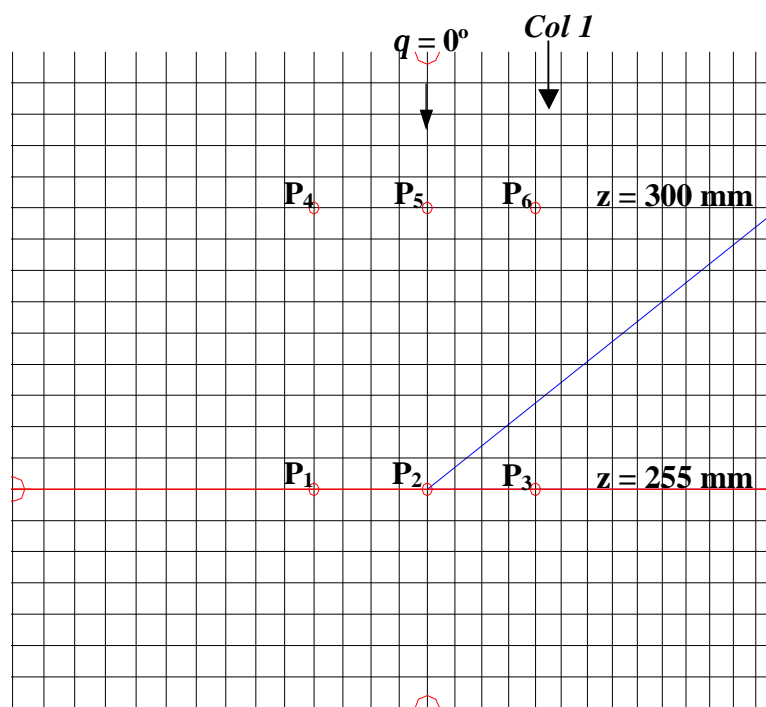


FIGURA 67 - Área característica em foco 1, vista  $V_3$

### 5.3.1. Configurações de deformação do corpo cilíndrico

As configurações do corpo cilíndrico são mostradas no caso do ensaio estático, para a aplicação das forças nos pontos  $q = 0^\circ$ ,  $z = 255$  mm e  $z = 380$  mm, e no caso dos ensaios aeroelásticos, para as velocidades iguais a 5,6 e 6,9 m/s.

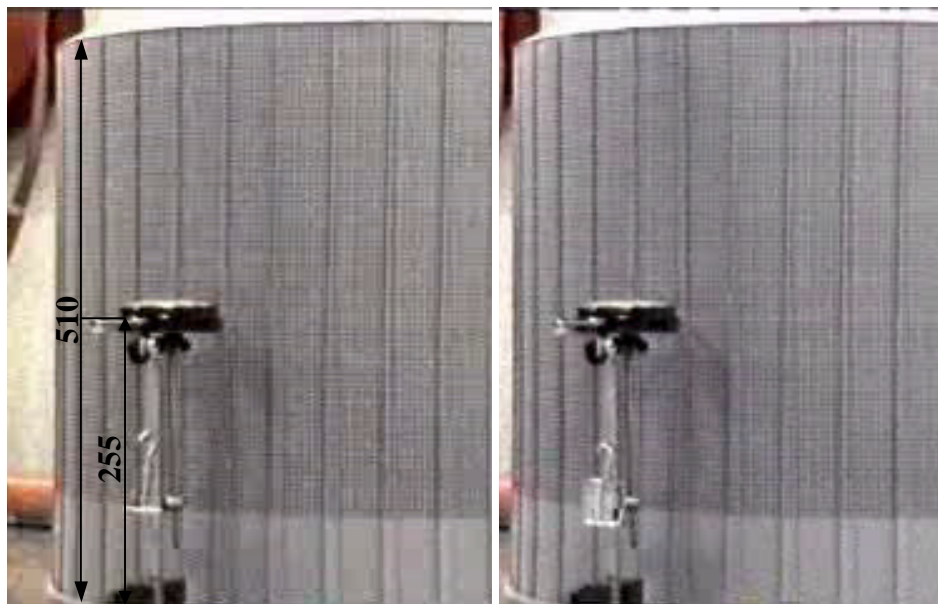
#### 5.3.1.1. Ensaio estáticos

Os resultados dos ensaios estáticos são apresentados na tabela 22, com as forças aplicadas e os respectivos deslocamentos radiais medidos por um transdutor. As forças foram aplicadas gradualmente com massas de 50, 100 e 140 g.

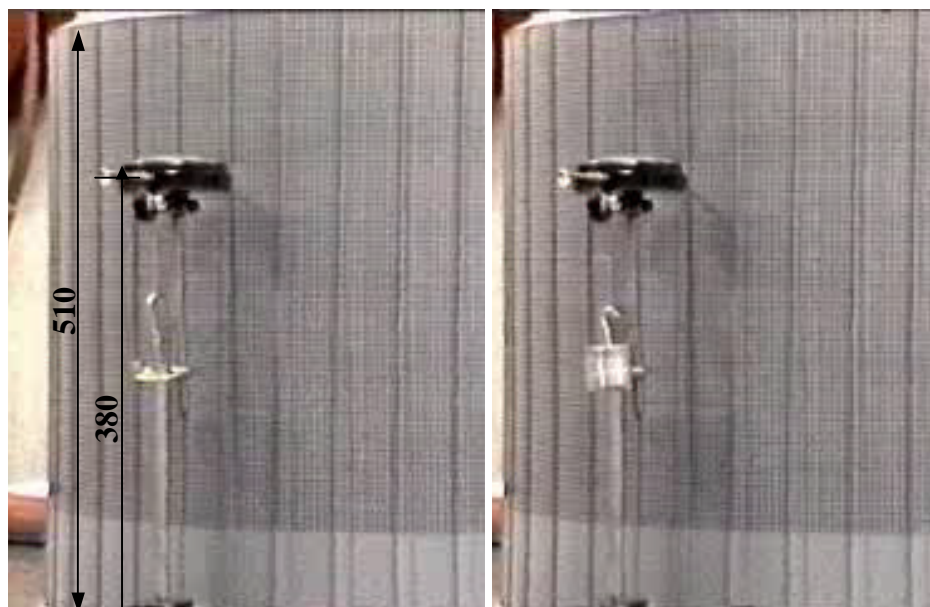
**TABELA 22 – Valores médios dos deslocamentos radiais dos ensaios estáticos medidos com o transdutor**

Cota z mm	Força N	Deslocamento radial, $\delta$ , mm	
		Média	Desvio padrão
255	0,49	3,4	0,15
	0,98	5,1	0,07
	1,37	6,2	0,18
380	0,49	3,9	0,13
	0,98	5,4	0,22
	1,37	6,6	0,21

As figuras 68 e 69 mostram o cilindro indeformado e com a força aplicada em  $z = 255$  mm e  $z = 380$  mm, a partir da posição 1,  $V_1$ .



**FIGURA 68 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N -  $z = 255$  mm,  $V_1$**



**FIGURA 69 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N -  $z = 380$  mm,  $V_1$**

As figuras 70 e 71 mostram o cilindro indeformado e com a força aplicada em  $z = 255$  mm e  $z = 380$  mm, a partir da posição 2,  $V_2$ .



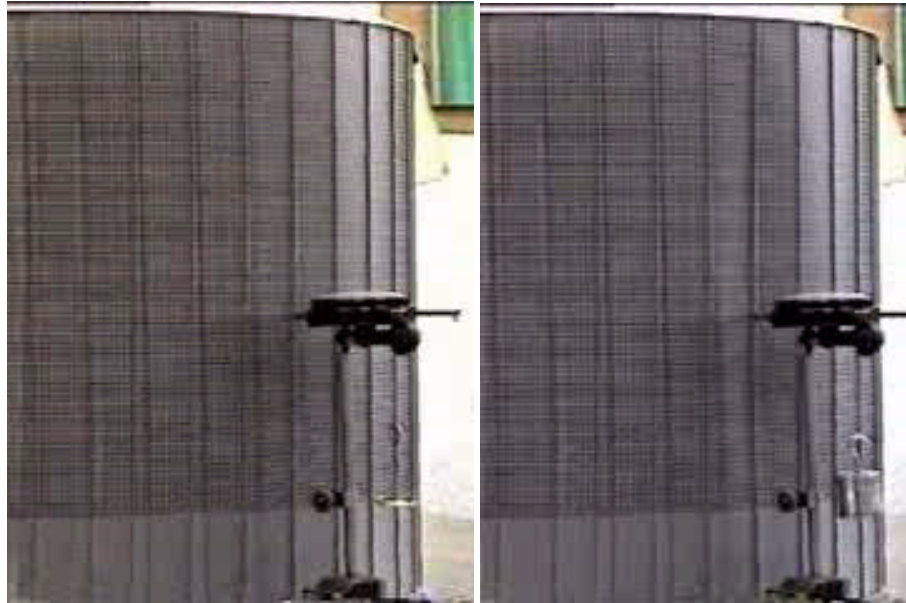
**FIGURA 70 – Cilindro indeformado e com força 1,37 N -  $z = 255$  mm,  $V_2$**



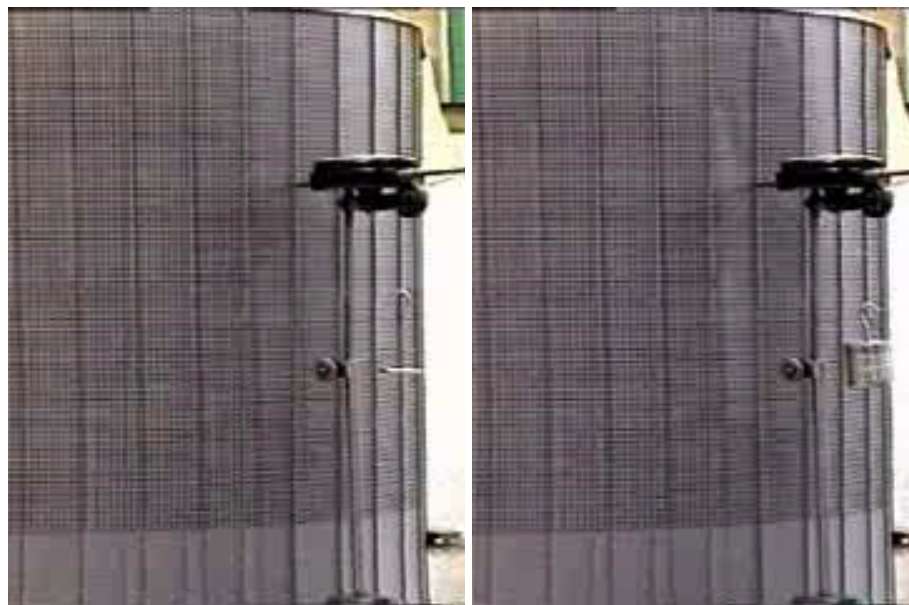
**FIGURA 71 – Cilindro indeformado e com força 1,37 N -  $z = 380$  mm,  $V_2$**



As figuras 72 e 73 mostram o cilindro indeformado e com a força aplicada em  $z = 255$  mm e  $z = 380$  mm, a partir da posição 3,  $V_3$ .



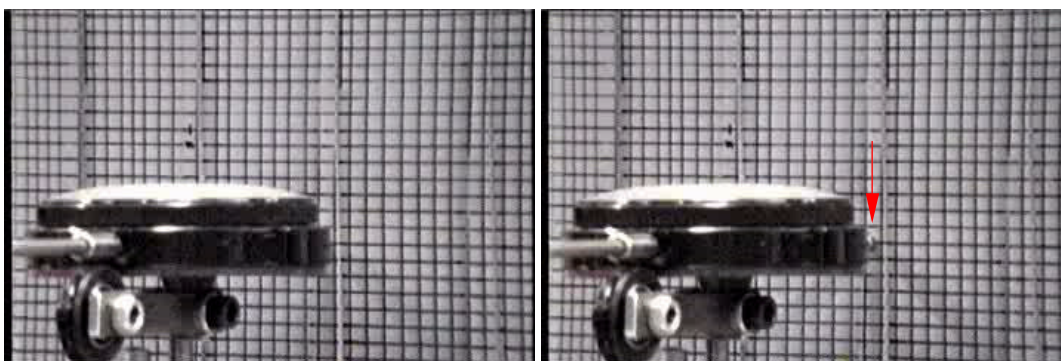
**FIGURA 72 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N -  $z = 255$  mm,  $V_3$**



**FIGURA 73 - Cilindro indeformado e com força 1,37 N -  $z = 380$  mm,  $V_3$**



Os deslocamentos por imagens foram calculados com o foco 1 a partir das três vistas  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ . A imagem a partir da vista 1 é dada como exemplo na figura 74. Observe-se o avanço da ponta do transdutor que aparece na imagem do modelo deformado (à direita), o que indica deslocamento da casca cilíndrica.



**FIGURA 74 – Imagens do modelo em indeformado(à esq.) e com força de 1,37 N**

O procedimento para as medidas dos deslocamentos começa com a superposição da imagem digitalizada do modelo deformado sobre a imagem do modelo indeformado. Então, a imagem da camada superior (modelo deformado) é modificada e fica translúcida. A partir deste estágio, a imagem do modelo deformado tem a sua opacidade aumentada até um percentual, em torno de 35%, em que é possível ver as duas imagens, a do modelo em repouso e a do modelo deformado. Deste modo, são medidas as diferenças na direção horizontal,  $\Delta x_{i1}^k$ , e vertical,  $\Delta x_{i2}^k$ , para os pontos  $P_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ .

Pela eq.(16) há três componentes dos deslocamentos no deslocamento geral de um elemento linear de PQ para P'Q'. A partir dos pontos mostrados na figura 63, são definidos os elementos lineares  $P_1P_4$ ,  $P_2P_5$ ,  $P_3P_6$ . É para estes elementos que são calculadas as componentes dadas na eq. (21).

Os cossenos diretores de  $OV_1$ ,  $OV_2$  e  $OV_3$  são obtidos em relação aos eixos 1, 2 e 3, conforme dimensões e direções dadas na figura 36. O  $\cos(OV_i \hat{s})$  indica o cosseno entre o vetor  $OV_i$  e o eixo  $s$ , com  $i, s = 1, 2, 3$ . Considera-se que os componentes  $\frac{\partial d_i}{\partial x_i} \cong 0$ , pois nas medidas em três direções é difícil distinguir o termo de deformação do de rotação a partir de imagens planas.

É importante esclarecer que o primeiro subscrito em  $\Delta x_{ij}^k$  indica o número da vista,  $i = 1, 2, 3$ , e o segundo,  $j = 1, 2$ , a direção horizontal (1) ou vertical (2). Com isto definido, as componentes  $d_i$  e  $\Delta d_i$  são calculadas a partir das vistas indicadas por  $0V_1$ ,  $0V_2$  e  $0V_3$  e as componentes  $L_i = d_i + \Delta d_i$  são aproximadamente dadas por:

$$d_1 = \Delta x_{11}^k / \cos 0V_1^2 \quad (37)$$

$$d_2 = \Delta x_{22}^k / \cos 0V_2^2 \quad (38)$$

$$d_3 = \Delta x_{32}^k \quad (39)$$

$$\Delta d_1 = (\Delta x_{11}^k - \Delta x_{11}^{k-3}) / \cos 0V_2^1, \text{ para } k = 4, 5, 6 \quad (40)$$

$$\Delta d_2 = (\Delta x_{22}^k - \Delta x_{22}^{k-3}) / \cos 0V_2^2, \text{ para } k = 4, 5, 6 \quad (41)$$

$$\Delta d_3 = \Delta x_{32}^k - \Delta x_{32}^{k-3}, \text{ para } k = 4, 5, 6 \quad (42)$$

A partir da resolução das imagens tomadas de  $0V_1$ ,  $0V_2$  e  $0V_3$ , que é de 2 pixels por 1 mm, e do tamanho da malha, são extraídas as diferenças  $\Delta x_{ij}^k$  entre o modelo indeformado e o modelo deformado em cada ponto  $P_k$ .

Com os valores das diferenças  $\Delta x_{ij}^k$  e as eq.(37) a (42) são calculados os deslocamentos radiais nos pontos  $z = 255$  mm e  $z = 300$  mm a  $\theta = 4,5^\circ$ .

**TABELA 23 – Valores obtidos por imagens dos deslocamentos radiais dos ensaios estáticos**

$\theta = 4,5^\circ$	Cota z mm	Força N	Deslocamento radial, $\delta$ mm
P <sub>3</sub>	255	1,37	6,3
P <sub>6</sub>	300	1,37	6,7

Comparando-se o valor da tabela 23 com aquele medido pelo transdutor à altura  $z = 255$  mm, da tabela 22, observa-se que o valor obtido por imagens é muito bom. A diferença é igual a 1,6% entre os deslocamentos médios medidos com o transdutor e por imagens.

Os deslocamentos são ligeiramente maiores na cota  $z = 300$  mm como se esperava, porque a rigidez da coluna é variável com a altura e é menor na cota 300 que na cota 255. A deformação em relação à direção tangencial ao perímetro está localizada na região próxima ao ponto de aplicação da carga com  $-4,45^\circ \leq \mathbf{q} \leq +4,45^\circ$ . Em relação à direção meridional, a deformação apresenta-se com deflexão ao longo de praticamente toda a altura  $0 \leq z \leq 510$  mm para a força aplicada em  $z = 255$  mm, conforme as figuras 66 e 70, e ao longo de  $100 \leq z \leq 510$  mm para a força aplicada em  $z = 380$  mm, como é observado nas figuras 69 e 73.

#### 5.3.1.2. Ensaio aeroelásticos

Os testes aeroelásticos foram gravados com a câmera em três posições diferentes e quatro níveis de focagem para as velocidades em que é possível observar uma interação do modelo com o vento. As três posições são definidas conforme a figura 36, e os níveis de focagem são i) a região central envolvendo duas colunas no meio do cilindro a  $z = 255$  mm e a  $\mathbf{q} = 0^\circ$ , ii) 2/3 da altura total do cilindro e todo o diâmetro e, iii) a altura total do cilindro e todo o diâmetro e, iv) o modelo inteiro.

As imagens foram digitalizadas e codificadas em DivX Codec 4.01, com resolução de 2 pixels por mm, a uma taxa de reprodução de 29,97 fps (“frames per second”), que indica o número de quadros reproduzidos por segundo.

A esta taxa de reprodução, cada quadro ocupa  $1/29,97 \cong 0,033$  s. A análise das imagens é feita quadro a quadro, o que significa que o erro de medida do tempo é dado por 0,0167 s. As medidas dos deslocamentos são feitas com precisão de 10% e acurácia de 4%, considerando-se a comparação entre os valores médios dos deslocamentos obtidos pelo transdutor e aqueles obtidos por imagens, com um erro no deslocamento igual a 0,5 mm em cada imagem plana.

Para as velocidades de 1,8 m/s até quase 5,6 m/s o modelo não apresenta uma resposta visível. A partir de 5,6 m/s ocorrem os primeiros movimentos da coluna 4 na região de mudança de pressões, aproximadamente a  $35^\circ$  da direção do vento.

O modelo foi testado gradualmente de 5,6 a 6,9 m/s, em que foram observados movimentos crescentes em número e intensidade na região a barlavento. Acima de 6,9 m/s os movimentos começaram a ficar muito pronunciados e, por isto, foi decidida a velocidade de 6,9 m/s como representativa, no sentido de prover informações sobre a máxima interação das forças do vento com o modelo.

Para um bom entendimento das deflexões, uma seleção das seqüências de imagens são detalhadas e descritas para as  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ , em quatro focos. Na tabela 24 é apresentado um resumo, cujos vídeos estão inseridos no VCD, nas pastas Vista 1, Vista 2 e Vista 3. O tempo total de exposição das imagens é 5 min e 51 s.

**TABELA 24 – Resumo dos trechos de vídeo dos ensaios aeroelásticos**

Vista	Foco	Tempo de exposição, s	Velocidade m/s	Descrição sucinta
1	1	9	5,6	Movimentos suaves na região central
	2	10	5,6	Movimentos imperceptíveis
	Modelo	10	5,6	Movimentos imperceptíveis
	3	20	6,9	Movimentos na região de sobrepressão
	Modelo	33	6,9	Vista geral dos movimentos
2	1	10	5,6	Movimentos imperceptíveis
	2	63	5,6	Primeiros movimentos nas colunas 4
	1	50	6,9	Boa percepção dos movimentos
	2	56	6,9	Movimentos pouco perceptíveis; dificuldade devida ao ângulo de visão
	Modelo	28	6,9	Percepção geral das ondulações na parte do modelo onde o vento incide
3	1	8	5,6	Movimentos suaves na região central
	2	17	5,6	Excelente para se perceber a movimentação da coluna 4
	1	9	6,9	Excelente trecho para a observação dos movimentos na região central
	2	28	6,9	Excelente trecho para a observação dos movimentos ondulatórios a barlavento

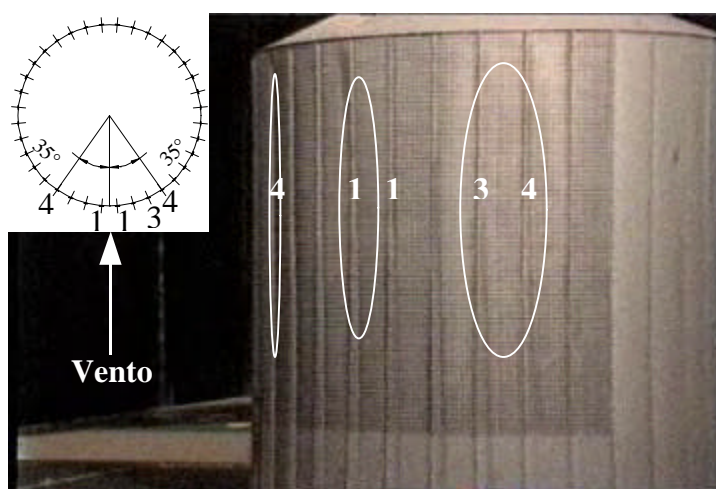
As descrições dos movimentos e as configurações de deformação da casca cilíndrica do modelo flexível são dadas na mesma ordem da tabela 24. Também são processadas as informações relativas ao tempo de duração das deflexões e os intervalos entre elas, além dos deslocamentos na região central para o foco 1. As explicações servem como um guia, mas não substituem as imagens contidas nas pastas Vista 1, Vista 2 e Vista 3, que dão uma idéia clara das deformações.

Na VISTA 1, FOCO 1, velocidade igual a 5,6 m/s, tempo de teste igual a 9 s, podem ser observados movimentos suaves da casca cilíndrica, em torno de 2 mm.

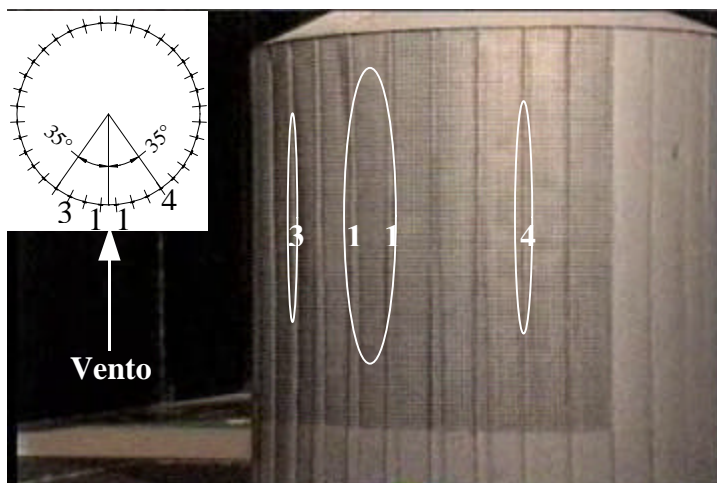
Na VISTA 1, FOCO 2, velocidade igual a 5,6 m/s, tempo de teste igual a 10 s, já existem os primeiros movimentos do modelo nas colunas 4 a  $\pm 35^\circ$  da direção do vento, mas dificilmente são percebidos desta posição.

Na VISTA 1, MODELO INTEIRO, velocidade igual a 5,6 m/s, tempo de teste igual a 10 s, os movimentos das colunas 4 não são percebidos.

Na VISTA 1, FOCO 3, velocidade do vento igual a 6,9 m/s, tempo de teste igual a 20 s, os movimentos são claramente percebidos. Ora uma das colunas 1 movimentam-se e, logo após, as colunas 3 e 4, como mostrado na figura 75. O outro caso é a deflexão das colunas 1 seguida à da coluna 4 ou da coluna 3, como mostrado na figura 76. No total, há cerca de 3 semi-ondas de deformação na região de sobrepressões, que rapidamente decaem, e não há mais deflexões a partir de  $45^\circ$ .

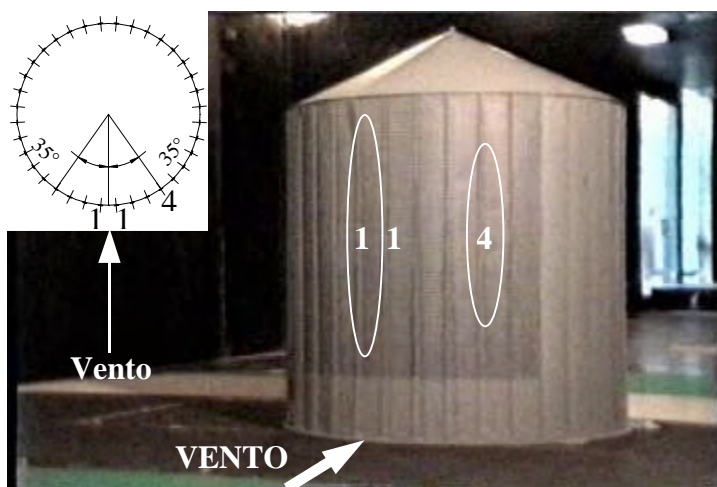


**FIGURA 75 – Ondulação em tempo alternado na coluna 1 e nas colunas 3 e 4;  
6,9m/s, vista 1, foco 3**



**FIGURA 76 – Configurações de deformação a barlavento; 6,9m/s, vista 1, foco 3**

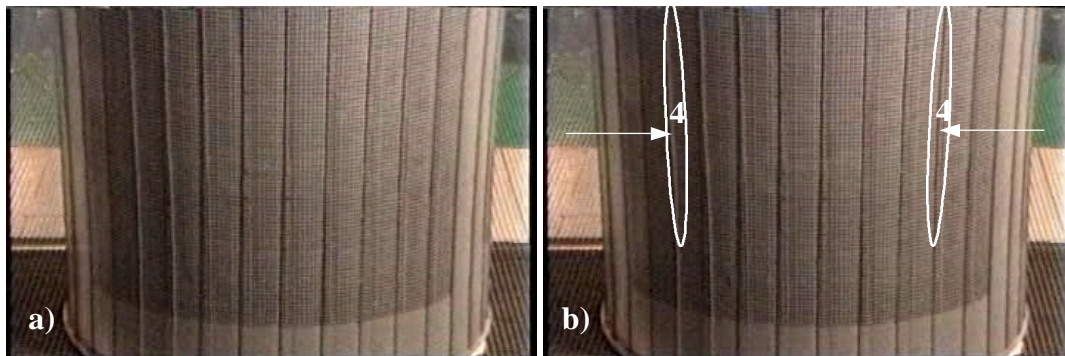
Na VISTA 1, MODELO INTEIRO, velocidade do vento igual a 6,9 m/s, tempo de teste igual a 33 s, mostrada na figura 77, a movimentação é semelhante à observada na vista 1, foco 3, e é possível uma vista dos movimentos como um todo.



**FIGURA 77 – Modelo flexível sob o vento a 6,9 m/s, vista 1**

Na VISTA 2, FOCO 1, velocidade igual a 5,6 m/s, tempo de teste igual a 10s, os movimentos não são percebidos na região central.

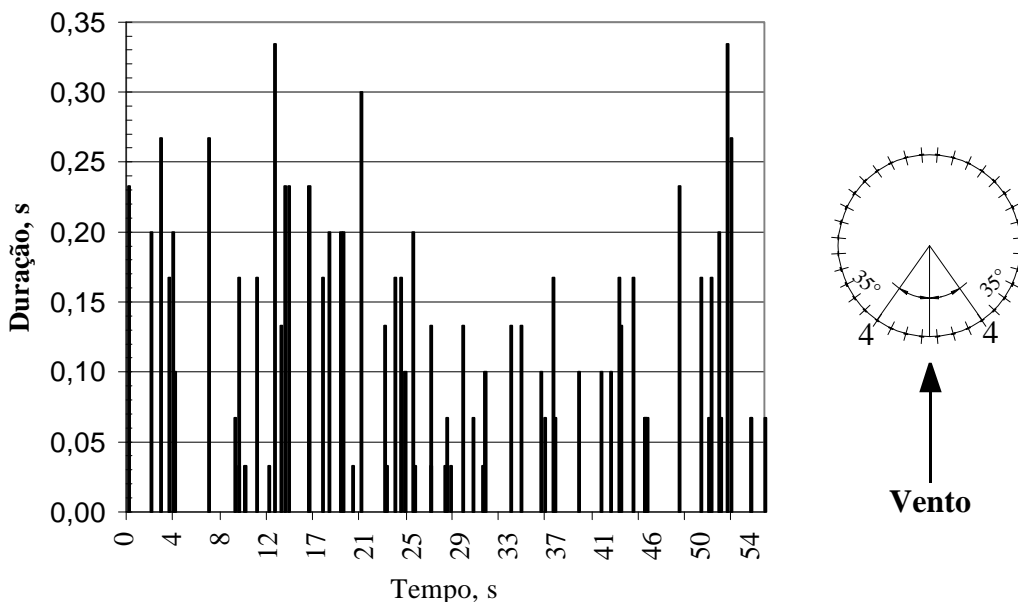
Na VISTA 2, FOCO 2, velocidade igual a 5,6 m/s, tempo de teste igual a 54,89 s, as colunas 4 a  $q = 35^\circ$  sofrem deflexões suaves, da ordem de 3 mm. Estas deflexões devem-se ao descolamento do escoamento de ar da superfície do cilindro. A figura 78 a) ilustra o modelo antes e a 78 b) após a deflexão.



**FIGURA 78 – Início de movimentação da coluna 4 a 35°; 5,6 m/s, vista 2, foco 2**

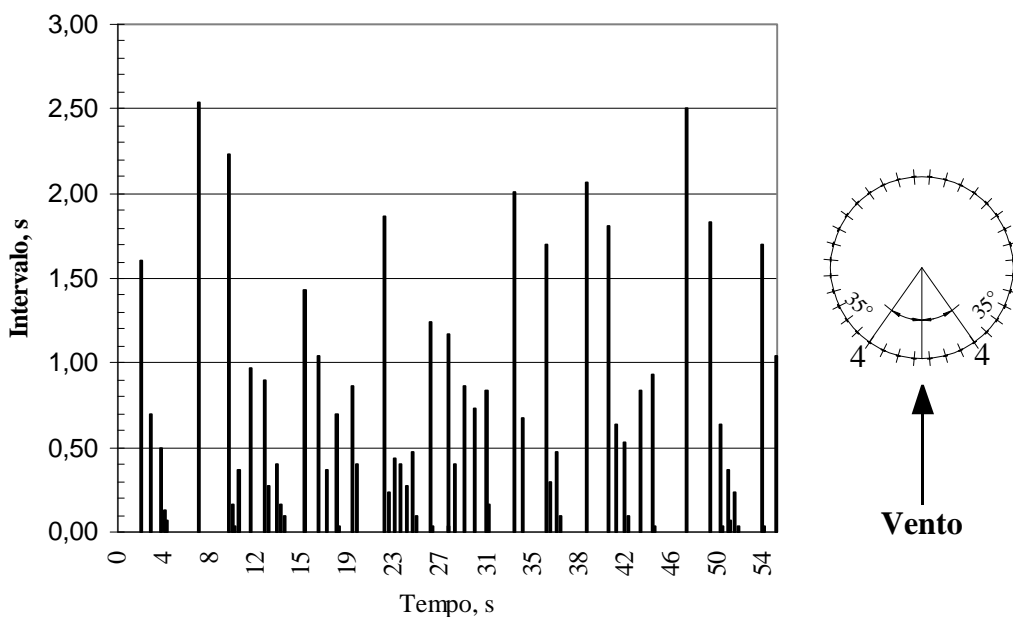
O tempo de duração de deflexão em cada coluna foi obtido pela diferença entre o número do quadro inicial e do quadro final, dividida pela taxa de reprodução do vídeo. A duração da deflexão é contada a partir da posição inicial para a posição deslocada, e daí até a posição inicial, ou seja, é o tempo de ida e volta da coluna.

Na figura 79 são apresentados os tempos de duração das deflexões em função do tempo de teste do modelo. O tempo médio de duração é igual a 0,14 s e o desvio padrão é igual a 0,08s. Foram contadas 66 deflexões, ou 1,2 deflexão/s.



**FIGURA 79 – Tempo de duração das deflexões na coluna 4; velocidade 5,6 m/s**

A figura 80 apresenta os tempos de intervalo entre duas deflexões consecutivas em função do tempo decorrido do teste do modelo sob a ação do vento. O intervalo médio entre deflexões é igual a 0,71 s e o desvio padrão é igual a 0,68 s.



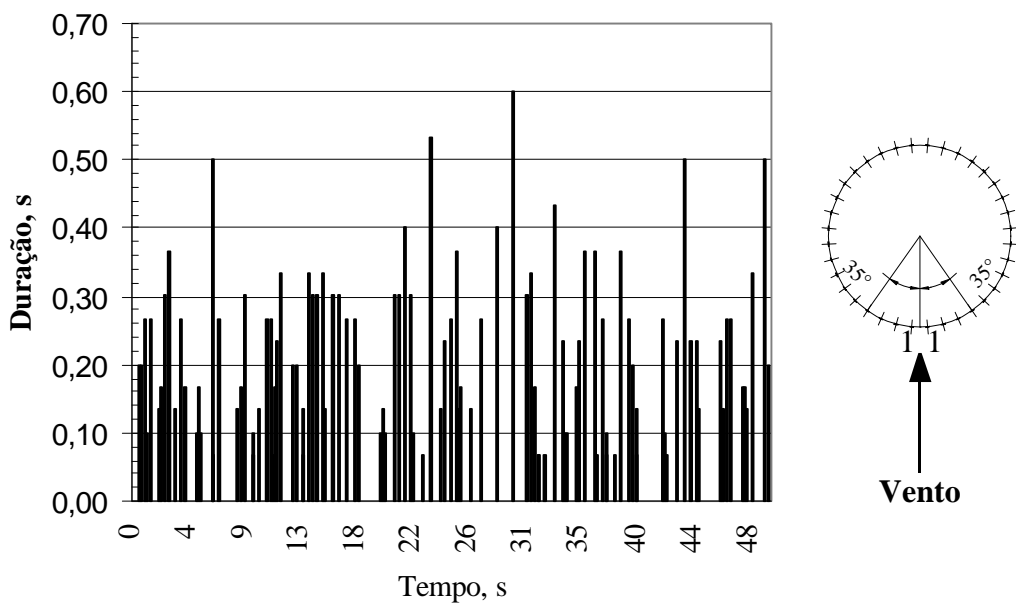
**FIGURA 80 – Intervalo entre as deflexões na coluna 4; velocidade 5,6 m/s**

Na VISTA 2, FOCO 1, velocidade do vento igual a 6,9 m/s, tempo de teste igual a 50 s, há movimentos na região central a barlavento, com movimentos decorrentes da turbulência do vento.

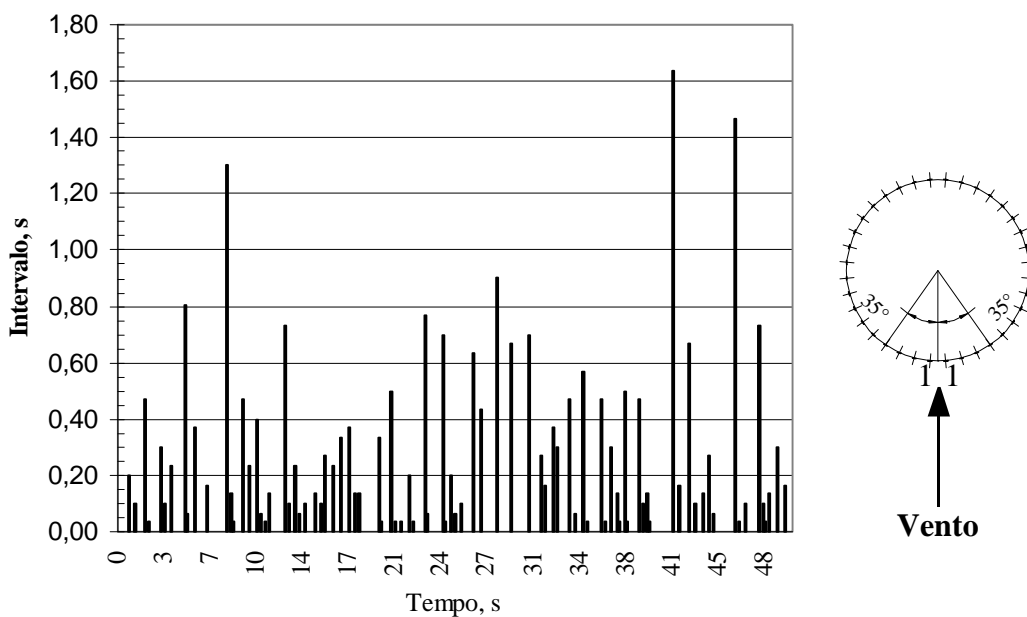
Na figura 81 são apresentados os tempos de duração das deflexões em função do tempo de teste do modelo sob a ação do vento. O tempo médio é igual a 0,23 s e o desvio padrão é igual a 0,15. Foram contadas 108 deflexões, ou 2,15 deflexão/s.

A figura 82 apresenta os tempos de intervalo entre duas deflexões consecutivas em função do tempo decorrido do teste do modelo sob a ação do vento. O intervalo médio entre deflexões é igual a 0,24 s e o desvio padrão é igual a 0,31 s.





**FIGURA 81 - Tempo de duração das deflexões na coluna 1; velocidade 6,9 m/s**

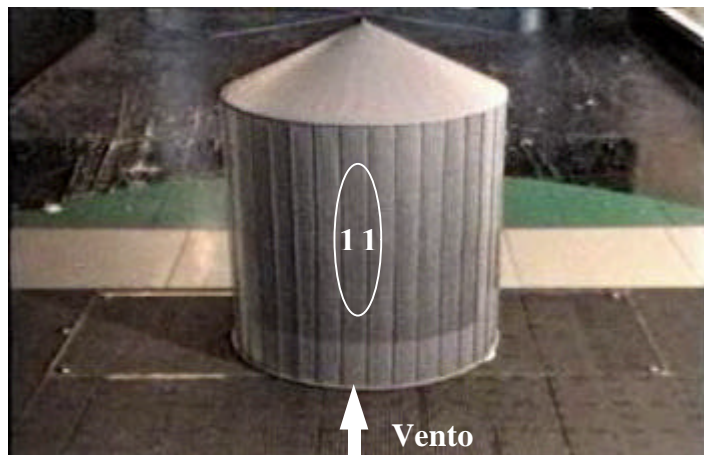


**FIGURA 82 - Intervalo entre as deflexões na coluna 1; velocidade 6,9 m/s**

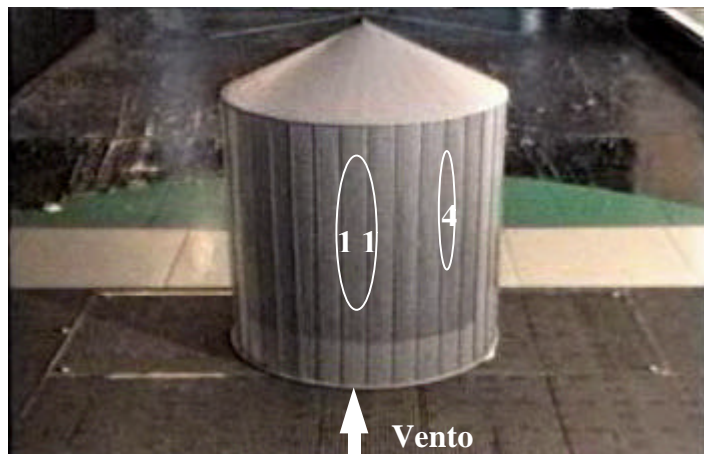
Na VISTA 2, FOCO 2, a 6,9 m/s, tempo de teste igual a 56 s, há movimentos em toda a região de sobrepressões e as colunas 1 e 3 e 4 sofrem deflexões, do mesmo modo que na vista 1, foco 3. No entanto, esta vista 2 não permite uma boa visualização das deformações.

Na VISTA 2, MODELO INTEIRO, velocidade igual a 6,9 m/s, tempo de teste igual 28 s, os movimentos ondulatórios na região frontal são percebidos como um todo, mas a percepção é menor em relação à vista 1, foco2. As figuras 83, 84 e 85 mostram configurações diferentes de deformação.

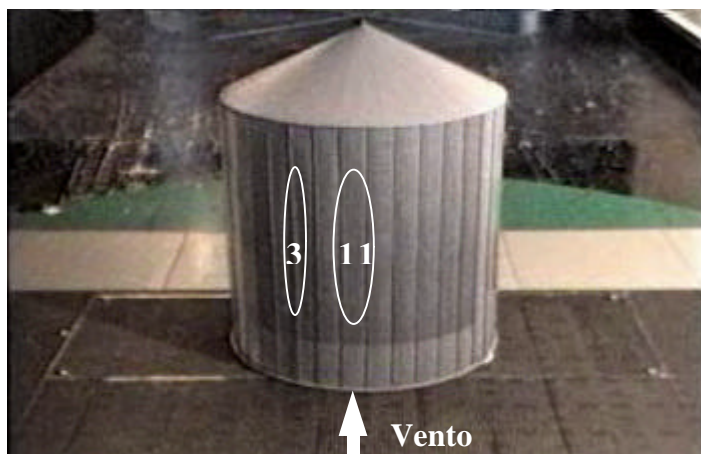
Na figura 83, uma onda envolve as colunas 1. É interessante compará-la às figuras 75 e 76 para perceber as configurações diferentes de deformações.



**FIGURA 83 – Ondulação da casca que envolve as colunas 1; vista 2**



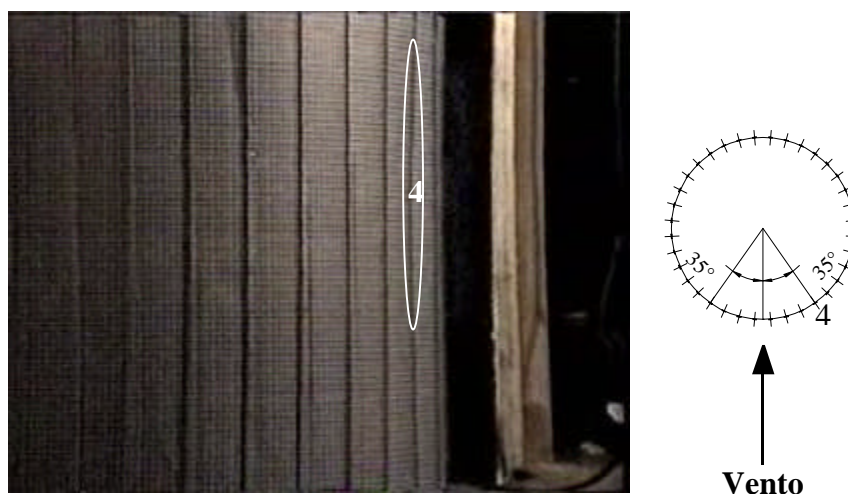
**FIGURA 84 - Ondulação da casca que envolve as colunas 1 e outra que envolve a coluna 4**



**FIGURA 85 - Ondulação da casca sobre as colunas 1 e outra sobre a coluna 3**

Na VISTA 3, FOCO 1, velocidade do vento igual a 5,6 m/s, tempo de teste igual a 8 s, praticamente não há movimentos da casca cilíndrica.

Na VISTA 3, FOCO 2, velocidade do vento igual a 5,6 m/s, tempo de teste igual a 17 s, as colunas a 35° sofrem deflexões suaves, da ordem de 2 mm. Estas deflexões devem-se ao descolamento do escoamento de ar da superfície do cilindro.

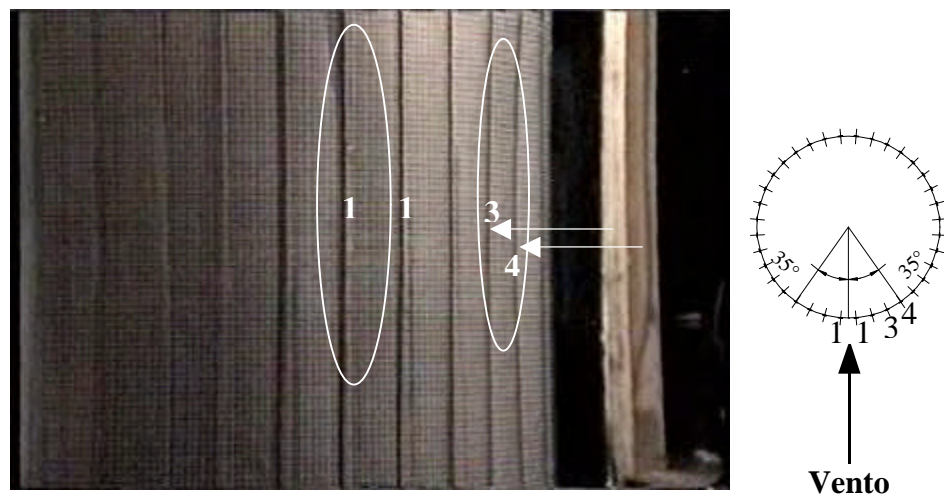


**FIGURA 86 – A coluna 4, a 35°, sofre deflexão; 5,6 m/s, vista 3, foco 2**

Na VISTA 3, FOCO 1, velocidade do vento = 6,9 m/s, tempo de teste igual a 9 s, os movimentos ondulatórios na direção do perímetro do cilindro são bem percebidos. É possível apreciar a influência das flutuações do vento nas deflexões.

Na VISTA 3, FOCO 2, velocidade 6,9 m/s, tempo de teste igual a 28 s, as colunas 3 e 4 sofrem deflexões fortes, ora ao mesmo tempo, ora a 3 primeiro e em seguida a 4. Estas deflexões devem-se ao descolamento do escoamento de ar da superfície. Também ocorrem movimentos na região a  $0^\circ$  nas colunas 1, ora as duas ora somente uma delas. As colunas 2 praticamente não são movimentadas pelas ondulações, provavelmente porque se encontram em pontos de inflexão.

Na figura 87 é mostrado o modelo com deflexões das colunas 3 e 4, que ocorreram ao mesmo tempo e, logo após, ocorreu a deflexão da coluna 1.



**FIGURA 87 – Deflexões das colunas 3 e 4 e das colunas 1; 6,9 m/s, vista 3, foco 2**

As amplitudes dos deslocamentos foram medidas diretamente das imagens no foco 1 com o uso dos pontos definidos na área plana das figuras 63, 64 e 65, a partir das vistas  $0V_1$ ,  $0V_2$  e  $0V_3$ . Os cálculos dos deslocamentos radiais foram realizados com as eq. (37) a (42), e os resultados estão na tabela 25.

**TABELA 25 – Deslocamentos radiais típicos da casca cilíndrica na região  $255 < z < 300$  mm,  $-4,5^\circ < q < +4,5^\circ$ , velocidade 6,9 m/s**

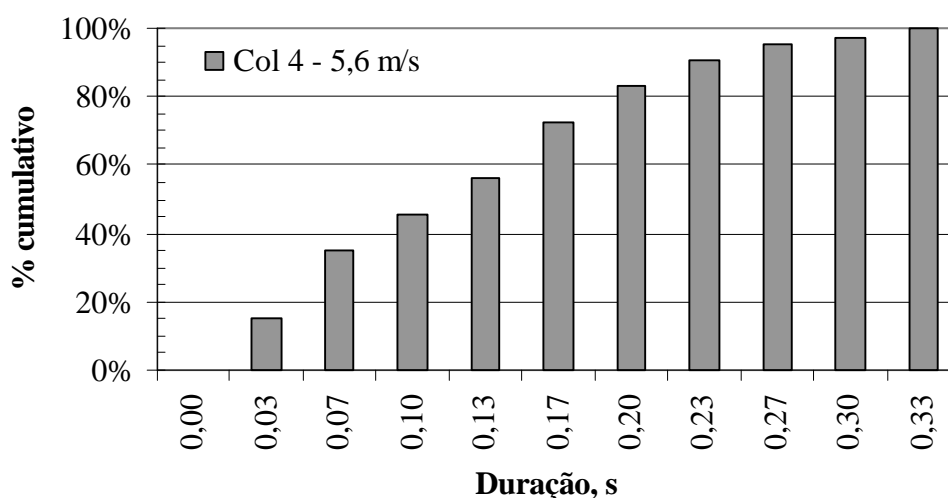
Pontos	1	2	3	4	5	6
Deslocamento, mm	6,0	5,5	5,0	5,2	2,8	2,8

#### 5.3.4. Análise da resposta do modelo flexível

O modelo flexível foi construído a partir de um silo protótipo com as ações principais decorrentes dos produtos granulares armazenados. Deste modo, a finalidade dos ensaios do modelo é simular a estrutura real de um silo quando se encontra vazio e sob a ação do vento. A avaliação da resposta do modelo é feita pelas configurações de deformação da casca cilíndrica, para as quais são medidos os tempos de duração das deflexões das colunas, os intervalos entre estas deflexões e, por fim, os deslocamentos na região à meia-altura do cilindro.

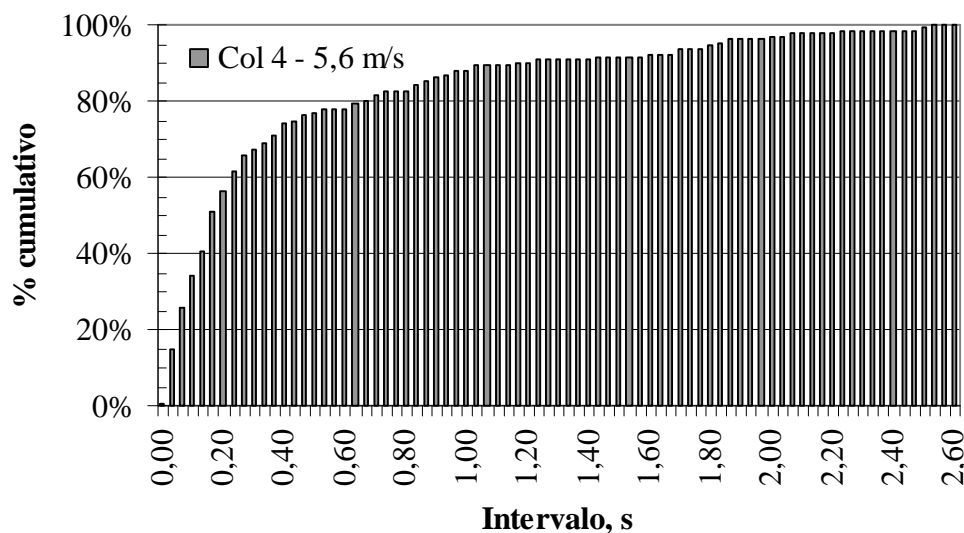
As primeiras respostas da casca cilíndrica que ocorrem a uma velocidade do vento igual a 5,6 m/s são as deflexões das colunas 4, situadas nas regiões de descolamento do escoamento a  $\pm 35^\circ$ . Estas deflexões não ocorrem simultaneamente nas duas colunas, mas alternam-se. Em primeiro lugar são analisadas as durações e depois os intervalos das deflexões de uma coluna 4.

Pela figura 81, o tempo máximo de duração de uma deflexão na coluna 4 é 0,33 s, o mínimo é 0,03 s e a média é igual a 0,14 s. Os tempos de duração que mais ocorrem são 0,07s (19,7%), 0,17s (16,7%) e 0,03s (15%) e na figura 88 é apresentado o gráfico de percentual cumulativo das durações das deflexões. Note-se que mais de 95% (95,5%) das durações está entre 0,03 s e 0,27 s, ou seja, a duração característica é de até 0,27 s com 95% de ocorrência.



**FIGURA 88 – Percentual de duração das deflexões da coluna 4; 5,6 m/s**

Pela figura 82, o intervalo máximo entre duas deflexões na coluna 4 é 2,54 s, o mínimo é 0,03 s e a média é igual a 0,71 s. Os intervalos que mais ocorrem são 0,03 (13,7%), 0,07 (11,5%) e 0,17 (10,7%) e na figura 89 é apresentado o gráfico de percentual cumulativo dos intervalos das deflexões. Note-se que cerca de 95% (95,4%) dos intervalos está entre 0,03 s e 1,8 s.



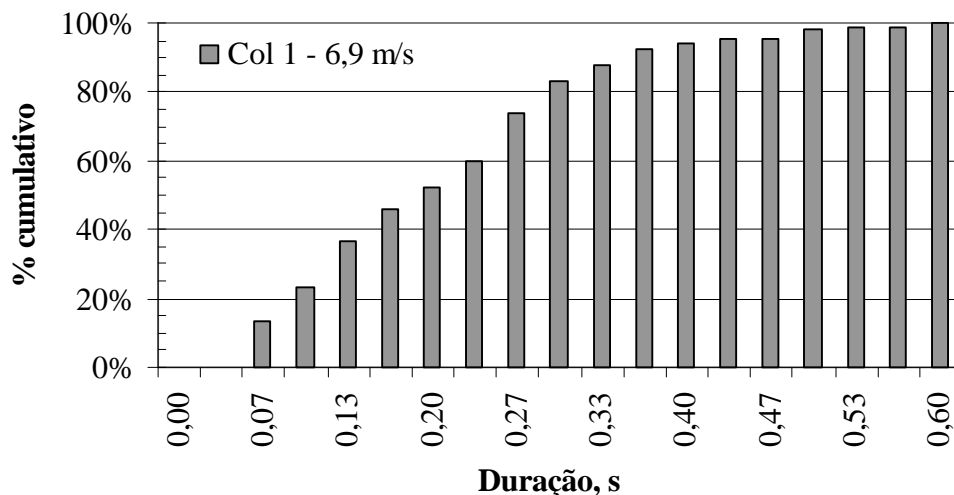
**FIGURA 89 – Percentual dos intervalos das deflexões da coluna 4; 5,6 m/s**

Quando a velocidade é aumentada para 6,9 m/s aparecem deflexões nas colunas 1, 3 e 4. A coluna 2 não sofre deflexões perceptíveis como as 1, 3 e 4, provavelmente porque se encontra em um setor de inflexão das ondulações.

A coluna 1 é escolhida como representativa dos tempos de deflexão para as demais colunas à velocidade de 6,9 m/s, porque logo em seguida às suas deflexões, ocorrem deflexões nas colunas 3 ou 4 e, mais esporadicamente, ao mesmo tempo nas duas colunas 3 e 4, com uma frequência de 0,30 deflexão/segundo. A frequência da coluna 1 é igual a 2,15 deflexões/s.

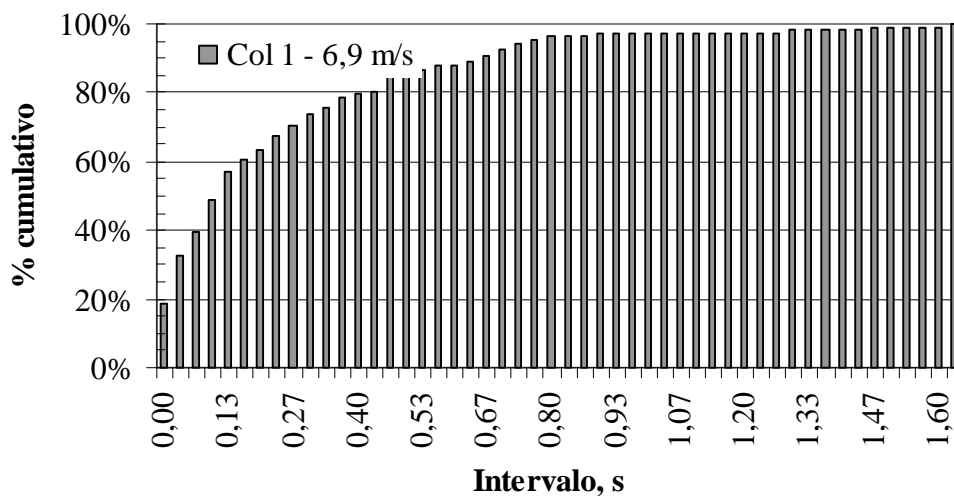
Pela figura 81, o tempo máximo de duração de uma deflexão na coluna 1 para uma velocidade de 6,9 m/s é 0,60 s, o mínimo é 0,07 s e a média é igual a 0,23 s. Os tempos de duração que mais ocorrem são 0,27 s (14,0%), 0,07 s e 0,13 s (13,1%) e 0,10 s (10,3%) e na figura 90 é apresentado o gráfico de percentual cumulativo das

durações das deflexões. Note-se que mais de 95% (95,3%) das durações está entre 0,03 s e 0,44 s, i.e., a duração característica é de até 0,44 s com 95% de ocorrência.



**FIGURA 90 – Percentual de duração das deflexões da coluna 1; 6,9 m/s**

Pela figura 82, o intervalo máximo entre duas deflexões na coluna 4 é 1,63 s, o mínimo é 0,00 s e a média é igual a 0,24 s. Os intervalos que mais ocorrem são 0,0167 (18,7%), 0,03 (14,%) e 0,10 (9,3%) e na figura 91 é apresentado o gráfico de percentual cumulativo dos intervalos das deflexões. Note-se que mais de 95% (95,3%) dos intervalos está entre 0,0167 s e 0,80 s.



**FIGURA 91 – Percentual dos intervalos das deflexões da coluna 1; 6,9 m/s**

Para uma velocidade do vento igual a 5,6 m/s, os deslocamentos na coluna 4 são estimados em um máximo de 3 mm, a partir dos deslocamentos medido pelo transdutor mecânico e pelos deslocamentos da coluna 1 medidos por imagens.

Além disto, as deflexões da coluna 4 são mais pronunciadas em 0,6H e se estendem de 0,4H até H, devido à redução do momento de inércia das colunas com o aumento da altura.

Os deslocamentos na região da coluna 1 para uma velocidade do vento igual a 6,9 m/s, apresentados na tabela 25, indicam a ordem de grandeza para as demais regiões onde ocorrem deflexões, quais sejam, para as colunas 3 e 4.

Deste modo, estima-se que os deslocamentos nas colunas 3 e 4 sejam da ordem de 6 mm. Os valores máximos dos deslocamentos ocorrem em torno da cota 0,6H, com deflexões que se estendem desde 0,3H até H.

#### **5.4. Interpretação dos resultados para os silos**

Os modelos utilizados nos ensaios foram calculados a partir dos protótipos dos silos reais de relação  $H/D = 0,5$  e  $1,0$ . Pelas leis da análise dimensional é possível extrapolar os resultados dos modelos para os silos protótipos.

Em primeiro lugar são discutidas as idealizações em que foram reduzidos os protótipos, e depois comparadas às condições de semelhança para os modelos que efetivamente foram atingidas nos ensaios.

Em segundo lugar, os resultados dos modelos são relacionados aos protótipos pelos fatores de escala correspondentes, de tal modo que é possível interpretar as magnitudes das grandezas físicas básicas, que são comprimento, massa e tempo.

Finalmente, a resposta do modelo flexível é interpretada para o protótipo de diâmetro 21,5 m e relação  $H/D = 1,0$ .



#### 5.4.1. Condições de semelhança dos modelos

O cálculo e o dimensionamento dos protótipos conduziram à determinação dos materiais e das dimensões dos modelos, conforme está descrito no capítulo 4 de procedimentos para os ensaios.

Na redução dos protótipos para os modelos rígidos as escalas definidas foram as de geometria, de velocidade e de turbulência do escoamento de ar, de modo a garantir as condições de semelhança aerodinâmica para as medidas das pressões. Neste caso, a de geometria é completamente atendida para o corpo cilíndrico, a cobertura cônica e as colunas, e as de velocidade, intensidade de turbulência e escalas temporal e espacial da turbulência também o são, mas dentro de certas tolerâncias.

As diferenças percentuais para as velocidades médias do vento no túnel são cerca de 4% maiores em relação às obtidas pela NBR6123 (1990) na faixa de 1,0 m até 19,0 m de altura, e 10% maiores na faixa de 19,0 até 26,0 m. Para a altura de referência igual a 10,0 m, o fator de velocidade é  $\lambda_U = 1/1,82$ , obtido pela divisão da velocidade 14,43 m/s no túnel e 26,25 m/s da NBR6123 (1990).

Para as intensidades de turbulência há diferenças para menos em relação aos valores da NBR 6123 (1990), da ordem de 20% entre 5,0 e 9,0 m, e de 10% a partir de 10,0 m até os 25,6 m de altura.

As escalas espacial e temporal da turbulência são adequadas para a simulação da resposta do modelo flexível à ação do vento. A espacial porque garante turbilhões de tamanho médio suficiente (da ordem de 400 mm) para excitar globalmente o modelo flexível. A temporal porque garante rajadas de duração média entre 0,025 s e 0,1 s, o suficiente para serem medidas as pressões médias em intervalos de 5 s.

Um outro parâmetro muito importante é dado pelo número de Reynolds que, para ambos modelos rígidos são maiores que  $1,0 \times 10^5$ , o que garante a similaridade aerodinâmica entre os modelos e as estruturas reais. Isto significa que o escoamento médio (medido pela velocidade média) e os turbilhões (medidos pela intensidade de turbulência, que é a componente flutuante em torno da velocidade média) exercem forças no modelo semelhantes às forças do vento sobre os silos em escala natural.

Para o modelo flexível, que tem a relação  $H/D$  igual a 1,0, devem ser mantidos os fatores de geometria, de rigidez, de massa e do escoamento (aerodinâmico).

A geometria do modelo flexível é semelhante no diâmetro e na altura do corpo cilíndrico e da cobertura cônica. As colunas no modelo têm espessura constante, igual a 2 mm, mas largura variável ao longo da altura. Em relação ao protótipo, a semelhança geométrica apresenta diferenças na faixa  $0 \leq z/H \leq 0,51$ , porque a espessura da coluna deveria ser igual a 7 mm, e a largura deveria ser constante e igual a 4 mm. No trecho  $0,51 < z/H \leq 1,0$  a espessura de 2 mm está correta, porque é semelhante à altura da coluna em escala real ( $\lambda_L = 1/42$ ; altura da coluna real é igual a 85 mm; logo,  $85/\lambda_L = 2,02 \cong 2$  mm), mas a largura deveria ser constante e igual a 7 mm, em vez de variar de 6,72 a 2,67 mm. Contudo, as diferenças na largura da coluna não têm efeito no arrasto do cilindro. A razão de serem admitidas estas diferenças na geometria das colunas é atender à condição de semelhança de rigidez à flexão.

Outro fator é a condição da superfície da casca cilíndrica do modelo, que é lisa, enquanto que no protótipo é corrugada. Entretanto, este fator não tem influência, porque as corrugações estão na mesma direção do vento e não alteram o arrasto.

Portanto, uma vez que as diferenças na geometria das colunas e da casca cilíndrica não afetam o arrasto, admite-se que a configuração geométrica do corpo cilíndrico do modelo flexível representa o protótipo do silo.

A condição de rigidez é calculada sobre a hipótese de ser mantida uma relação constante e de referência da pressão do vento para a rigidez à flexão da casca e das colunas, tanto no modelo quanto no protótipo. Como ocorre uma variação da espessura das chapas ao longo da altura, admite-se um momento de inércia de referência a partir de uma espessura  $t$  definida a  $0,7H$  e uma pressão calculada para um fator de velocidade  $\lambda_U = 0,5$ . A espessura  $t$  foi devidamente reduzida, e o fator de velocidade atingido foi 0,55 (10% de diferença em relação ao valor 0,5 predefinido).

A rigidez à flexão para as colunas, verificada pela variação de inércia ao longo da altura, foi completamente simulada para o modelo flexível, na mesma hipótese de velocidade usada para as chapas da casca cilíndrica.

Deste modo, já que a casca cilíndrica lisa tem rigidez equivalente à casca corrugada e a rigidez à flexão das colunas é simulada completamente, a rigidez do corpo cilíndrico é adequada à simulação do silo à ação do vento.

É importante salientar que a cobertura cônica foi inteiramente ligada ao corpo cilíndrico do modelo e enrijeceu completamente o topo.

Quanto à similaridade de massa, ela é totalmente atingida para a cobertura, porque a relação entre a massa para o volume da cobertura do protótipo é igual a  $9,13 \text{ kg/m}^3$  e a do modelo é igual a  $9,21 \text{ kg/m}^3$  (a massa da cobertura do modelo é 80 g). Para o corpo cilíndrico, a relação massa/volume do protótipo é igual a  $5,19 \text{ kg/m}^3$ , e a do modelo é igual a  $4,23 \text{ kg/m}^3$ , ou seja, uma diferença de 24%.

#### 5.4.2. Correspondência dos resultados

A correspondência dos resultados obtidos para os modelos é feita para os protótipos com o uso das leis de semelhança física deduzidas na metodologia.

De acordo com elas, é montada a tabela 26, com os fatores  $\lambda$  que relacionam as magnitudes das grandezas físicas fundamentais de comprimento, massa e tempo do modelo às do protótipo.

**TABELA 26 – Magnitudes dos fatores de escala**

$\lambda_L$	$\lambda_M$	$\lambda_T$
1/42	$1,35 \times 10^{-5}$	1/21

Deste modo, a um deslocamento de 1 mm no modelo corresponde um valor  $1/\lambda_L$  igual a 42 mm no protótipo.

Os coeficientes de pressão, como são adimensionais, podem ser utilizados diretamente com a velocidade determinada pela norma de vento à altura H, para o cilindro, e à altura H+b, para a cobertura cônica.

### 5.4.3. Interpretação da resposta do modelo flexível

O modelo flexível foi confeccionado para a simulação do comportamento de uma estrutura de um silo com corpo cilíndrico em chapas metálicas corrugadas que estão conectadas a colunas externas.

O corpo do modelo cilíndrico foi admitido como uma casca lisa, equivalente às chapas corrugadas, e enrijecido por colunas. O valor utilizado à verificação do estado limite de deslocamentos excessivos da estrutura está de acordo com ABNT (2000). Neste caso, as colunas são consideradas como longarinas de fechamento geral sob a ação do vento e o limite máximo é dado por  $L/120$ , em que  $L$  é o comprimento da coluna. Como a coluna tem  $L = 510$  mm, então o deslocamento máximo dever ser igual a 4,25 mm.

É importante salientar que o topo do modelo não sofre deslocamentos na direção do vento, porque a cobertura está completamente conectada ao costado. Esta observação também é feita em BRIASSOULIS & PECKNOLD<sup>2</sup> (1986).

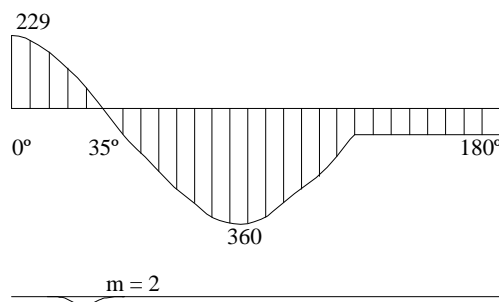
As primeiras deflexões do modelo ocorreram na coluna 4, com deslocamentos máximos de 3 mm, para uma velocidade do vento igual a 5,6 m/s.

Para o protótipo, de diâmetro 21,5 m, isto corresponde a um deslocamento de  $3 \times 42 = 126$  mm. O limite é dado por  $21500/120 = 179$  mm, para uma velocidade igual a 11,2 m/s.

À medida que a velocidade é aumentada de 5,6 a 6,9 m/s, surgem deflexões nas colunas 1 e 3 além das que já ocorriam nas colunas 4. Os deslocamentos máximos alcançados foram da ordem de 6,0 mm, o que daria um limite  $L/85$ , maior que o limite  $L/120 = 4,25$  mm.

Para o protótipo, a velocidade do vento corresponde a  $6,9 \times 2 = 13,8$  m/s e o deslocamento a  $6,0 \times 42 = 252$  mm, que é 41 % a mais do valor limite  $L/120$ .

Os testes dos modelos em alumínio que foram realizados por RESINGER & GREINER (1981) indicam para a configuração das deformações à ação do vento o número de duas semi-ondas localizadas na região de pressões positivas. O modelo utilizado tinha  $D = 440$  mm,  $H/D = 1,0$ , cobertura plana e espessura do cilindro uniforme e igual a  $t = 0,105$  mm. A pressão crítica que levou à perda de estabilidade do cilindro era de  $229 \text{ N/m}^2$ , com mostrado na figura 92.



**FIGURA 92 – Situação de perda de estabilidade de um cilindro de alumínio para uma pressão crítica do vento. RESINGER & GREINER (1981)**

A configuração de duas semi-ondas de deformação ocorre na coluna 4 do modelo 1,0 à velocidade de 5,6 m/s,  $C_{pe} = 0,92$ , que corresponde a uma pressão de  $17,7 \text{ N/m}^2$ . Em escala real, isto significa que para uma pressão igual a  $4 \times 17,7 = 70,8 \text{ N/m}^2$  o silo perderia a estabilidade da casca cilíndrica.

A constatação da necessidade de um enrijecimento da parede cilíndrica do silo advém da resposta de deflexão que ocorre na coluna 4. A questão é se a magnitude do deslocamento máximo, igual a  $3 \times 42 = 126 \text{ mm}$  em escala real, é suficiente para amassar as chapas do silo.

Por um lado, se se admite o deslocamento limite igual a  $L/120 = 179 \text{ mm}$ , então não ocorre amassamento do costado.

De outro, considerando-se que o costado tem um componente sensível a deslocamentos excessivos, que são as finíssimas chapas corrugadas em aço de elevada resistência, então o limite cai para  $L/180 = 119 \text{ mm}$  e ocorre o amassamento.

Uma análise da exatidão do deslocamento máximo que foi estimado em 3 mm para o modelo 1,0, considerando-se uma variação de 10%, dá ou um deslocamento de  $2,7 \times 42 = 113 \text{ mm}$  ou  $3,3 \times 42 = 139 \text{ mm}$ .

Do ponto de vista prático é suficiente saber que a 5,6 m/s o costado sai do repouso e que a magnitude do deslocamento pode ocasionar um amassamento.

O estabelecimento deste fato conta com uma verificação do início da deflexão da coluna 4 dada pela comparação com o estudo de UEMATSU & UCHIYAMA (1985).

No trabalho de UEMATSU & UCHIYAMA (1985) foi verificado que, para um cilindro liso de poliéster, com cobertura plana,  $E = 5,55 \times 10^3$  MPa,  $D = 150$  mm,  $H/D = 2$ ,  $t = 0,105$  mm, as deflexões do cilindro iniciaram-se a  $Re = 1,1 \times 10^5$ , com  $I = 8\%$ , ou seja, para  $D.U = 1,61$  m/s<sup>2</sup>.

Considerando-se as diferenças na relação  $H/D$  e a presença de colunas, o modelo 1,0 apresentou as primeiras deflexões em  $Re = 1,96 \times 10^5$ , com  $I = 18\%$ , ou seja, para  $D.U = 0,51 \times 5,6 = 2,86$  m/s<sup>2</sup>.

A comparação entre os valores de UEMATSU & UCHIYAMA (1985) e os valores obtidos para o modelo 1,0 não pode ser direta, mas indica que é coerente o início das deflexões do modelo 1,0 dar-se a um  $Re$  mais elevado. Acredita-se que isto se deve às colunas externas que conferem uma rigidez maior à casca cilíndrica.

É importante frisar que esta é uma constatação de um parâmetro,  $Re$ , para indicar o início das deflexões e definir a necessidade de um enrijecimento da casca cilíndrica na direção do perímetro. Outras deduções a partir desta afirmativa, tal como a pressão crítica do vento, podem ser obtidas a partir de um estudo mais detalhado para modelos com elementos externos, como colunas e anéis de enrijecimento, que envolva uma abordagem semelhante às indicadas em RESINGER & GREINER (1981) e UEMATSU & UCHIYAMA (1985).

## 5.5. Comentários

Os testes realizados sobre todos os modelos são para a avaliação do comportamento dos silos cilíndricos à ação do vento pelas maneiras possíveis em túnel de vento. Pela primeira são medidas as pressões e com a outra é feita uma visualização do escoamento de ar na superfície externa, ambas nos modelos rígidos. Por último, com o modelo flexível, é possível estudar as configurações de deformações e fazer várias medidas que permitem definir a ordem de grandeza dos deslocamentos na casca cilíndrica e os tempos, intervalos e frequências de deflexão em que ocorrem.

Com os dois modelos rígidos são compilados os dados relativos às pressões externas e derivados os coeficientes de força do vento sobre os modelos, bem como interpretadas as regiões de descolamentos de escoamento com o auxílio dos gráficos de distribuição de pressões e da visualização de escoamento com linhas de seda na superfície.

Com o modelo flexível são medidos os tempos de duração das deflexões e os seus intervalos correspondentes, derivados os tempos médios e os característicos e as frequências em que ocorrem durante um certo intervalo de tempo. Também são estimados os valores dos deslocamentos para as colunas que sofrem deflexão.

Os valores das pressões externas foram comparados com aqueles selecionados na literatura e indicam boa conformidade em relação aos pontos de separação do escoamento da casca cilíndrica e aos valores dos coeficientes de pressão externa,  $C_{pe}$ , para os modelos com superfície lisa. Para a cobertura lisa há menor quantidade de resultados na literatura, mas os existentes comprovam os valores e a distribuição dos  $C_{pe}$  obtidos neste trabalho.

Para os modelos com superfície cilíndrica nervurada não há muitos artigos e os que foram encontrados não são recentes, com cerca de 40 e até 70 anos. Isto significa que a simulação das condições do escoamento de ar gerado no túnel não foi realizada e descrita conforme os métodos atuais, e faltam com detalhes e parâmetros estatísticos. Mesmo assim, os valores dos  $C_{pe}$  não apresentam discrepâncias em relação aos valores obtidos. A resposta geral e as mudanças dos coeficientes em

decorrência das nervuras indicam um mesmo comportamento em relação aos resultados obtidos nos presentes ensaios. Deste modo, a contribuição é um conjunto de dados atualizados, com características de semelhança e simulação bem definidas, com repetições dos testes e aplicabilidade direta para os silos cilíndricos com coberturas cônicas.

Para as coberturas dos modelos são obtidos resultados de pressão em superfícies lisas e com fios. A necessidade de dados para a superfície com fios é representar as dobras das chapas usadas em coberturas cônicas metálicas e seus efeitos nas distribuições de pressões.

No geral, os resultados para a cobertura lisa estão em conformidade com aqueles comparados na literatura, o que indica que o método utilizado é adequado.

Quanto à superfície cônica com fios, não havia resultados disponíveis para comparação. Os valores obtidos nos ensaios revelaram uma redução dos coeficientes de pressão na cobertura devida aos fios, o que é benéfico à estrutura.

Também foram detalhados os valores dos  $C_{pe}$  na junção do corpo cilíndrico à cobertura cônica. O efeito geral é uma redução significativa, em torno de 60%, destes coeficientes devido à colocação dos fios, o que é benéfico à estrutura do silo.

Os valores derivados dos  $C_{pe}$ , que são os coeficientes de arrasto e de sustentação, revelam que os valores da NBR 6123 (1990) são conservadores para os cilindros com nervuras externas, mas estão em conformidade para os cilindros lisos.

As visualizações dos escoamentos de ar junto às superfícies dos modelos rígidos servem, em conjunto às distribuições de pressões, como auxiliar à localização das regiões de separação de escoamento e desprendimento de vórtices. Deste modo, foram confirmadas a ocorrência de vórtices na base e a pequena sucção na região posterior (a sotavento) do cilindro, e a intensidade de movimentação dos vórtices localizados na parte anterior (a barlavento) do cilindro. Na cobertura, é possível perceber com clareza que praticamente não há vórtices, oposto ao que ocorre no cilindro.

O modelo flexível foi construído em poliéster e em polietileno com relação  $H/D=1,0$  e superfície externa com nervuras.

Na literatura foram encontrados testes em modelos de alumínio em RESINGER & GREINER (1981), com superfície lisa, com o objetivo de serem



medidas as pressões que provocam perda de estabilidade da casca cilíndrica. Com base nas constatações feitas para os modelos em alumínio e nos ensaios feitos com o modelo flexível, afirma-se que a configuração de deformação é de 2 semi-ondas para os silos metálicos de chapas corrugadas e colunas externas, mas sem anel de enrijecimento.

Noutro estudo de UEMATSU & UCHIYAMA (1985) foi utilizado um modelo cilíndrico de  $H/D=2,0$  e cobertura plana, também em poliéster, mas com superfície lisa, para o estudo do comportamento dinâmico do cilindro relacionado às características dos campos de pressões. Com base nestes autores, os resultados que foram obtidos para o modelo 1,0 indicam que as primeiras deflexões em um silo cilíndrico de chapas metálicas corrugadas com colunas externas podem ocorrer a partir de  $Re = 2,0 \times 10^5$ .

Em comparação aos objetivos deste trabalho, foi feita uma análise do início de movimentação do cilindro com nervuras em relação à velocidade de incidência do vento. Os tempos característicos de duração e de intervalos entre deflexões foram medidos por imagens, sendo também medidos os deslocamentos na região frontal do cilindro (onde o vento incide) e estimados os deslocamentos nas demais regiões até a proximidade daquela de separação do escoamento do cilindro. Portanto, foi atingido o objetivo de estudo do comportamento do modelo flexível à ação do vento, qual seja, o de fornecer elementos para o entendimento das configurações de deflexão das colunas e os respectivos valores de deslocamentos, uma vez caracterizados os campos de pressão com os modelos rígidos.

Com os resultados do modelo flexível, é possível definir as alturas para que seja enrijecido o corpo cilíndrico de maneira adequada. Primeiro em relação a quantos anéis, porque foram definidos os limites de deflexão das colunas, que são  $0,3H$  acima da base e junto à cobertura cônica. Segundo, em relação à extensão da deformação no perímetro, o que permite definir, junto com as estimativas de deslocamentos, a ordem de enrijecimento necessária aos anéis.

## 6. CONCLUSÕES

---

---

Na engenharia as estruturas dos silos são calculadas com a finalidade principal de suportarem as ações devidas aos produtos armazenados. A ação variável do vento é importante para o caso em que o silo é metálico e se encontra vazio e é necessário entender o seu comportamento para a verificação da estabilidade local e global do corpo cilíndrico.

Os ensaios em túnel de vento foram definidos para a avaliação das pressões e dos coeficientes de força no corpo e na cobertura cônica, e das configurações de deformação do corpo dos silos cilíndricos.

Os valores sugeridos pela NBR 6123 (1990) para os coeficientes de pressão no corpo do silo cilíndrico devem ser usados para um escoamento de ar acima da região crítica, ou seja, para número de Reynolds acima de  $4,2 \times 10^5$ , ou seja, para  $D.U > 6,14 \text{ m/s}^2$ , e com a pressão dinâmica  $q$  calculada à altura de referência igual a 10,0 m.

Mantendo-se estas mesmas condições da norma, é proposta uma altura de referência em H porque se reporta diretamente à geometria do silo, e o valor da pressão dinâmica do vento pode ser facilmente calculado para esta altura.

Para os cilindros com relação  $H/D = 0,5$  os valores dos  $C_{pe}$  da norma brasileira podem ser usados para a superfície lisa e, se usados para a superfície com elementos externos, ou saliências, os valores estão a favor da segurança.

Para os cilindros com relação  $H/D = 1,0$  os  $C_{pe}$  positivos obtidos no presente trabalho estão de acordo com aqueles fornecidos pela norma brasileira, mas são diferentes na região de pressões negativas, principalmente para o cilindro liso.

Deste modo, são fornecidos na tabela 27 os valores dos  $C_{pe}$  para os cilindros de relação  $H/D = 0,5$  e  $1,0$ . Salienta-se que a pressão dinâmica  $q$  é calculada à altura de referência H, conforme o procedimento da NBR 6123 (1990).

**TABELA 27 – Distribuição das pressões externas para os silos cilíndricos de relação  $H/D = 0,5$  e  $1,0$**

$\theta$	Coeficientes de pressão externa $C_{pe}$			
	Pressão dinâmica $q$ à altura $H$			
	Superfície Lisa		Superfície com Colunas	
	0,5	1,0	0,5	1,0
$0^\circ$	0,9	0,85	0,80	0,85
$10^\circ$	0,8	0,8	0,75	0,7
$20^\circ$	0,6	0,5	0,6	0,5
$30^\circ$	0,3	0,2	0,4	0,2
$35^\circ$	0,15	0	0	0
$40^\circ$	0	-0,2	-0,3	-0,3
$50^\circ$	-0,4	-0,6	-0,5	-0,65
$60^\circ$	-0,75	-1,0	-0,7	-0,8
$70^\circ$	-1,00	-1,3	-0,8	-0,9
$80^\circ$	-1,14	-1,5	-0,6	-0,7
$90^\circ$	-1,14	-1,5	-0,6	-0,6
$100^\circ$	-0,95	-1,3	-0,5	-0,5
$110^\circ$	-0,39	-1,0	-0,5	-0,5
$120^\circ$	-0,39	-0,6	-0,45	-0,5
$140^\circ$	-0,39	-0,5	-0,4	-0,5
$160^\circ$	-0,39	-0,5	-0,4	-0,5
$180^\circ$	-0,39	-0,5	-0,4	-0,5

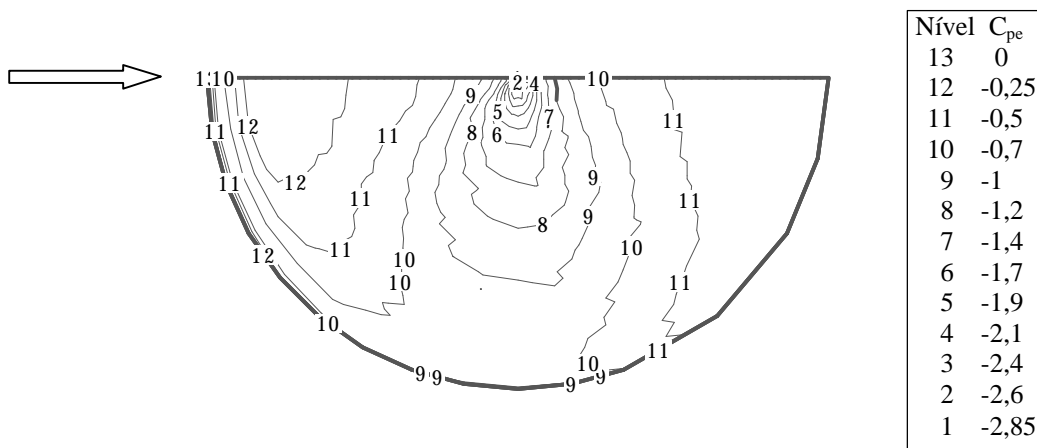
Os valores dos coeficientes de arrasto  $C_a$  sugeridos pela NBR 6123 (1990) são mantidos para os silos lisos, porque estão em conformidade com os resultados obtidos. Para os cilindros com colunas externas de relação para a altura da coluna próximas a  $0,01.D$ , é sugerido o valor  $0,6$ , inferior ao da NBR 6123 (1990), que adota  $0,7$  para a relação  $0,02.D$ . Para relações próximas a  $0,08.D$ , os valores da NBR 6123 (1990) são mantidos. Para relações intermediárias os coeficientes podem ser estimados por interpolação linear.

Na tabela 28 são apresentados os valores dos coeficientes de arrasto sugeridos para a relação de altura das nervuras próximas a  $0,01.D$  e os valores da NBR 6123 (1990) para  $0,02.D$  e  $0,08D$  para os silos cilíndricos de relação  $H/D = 0,5$  e  $1,0$

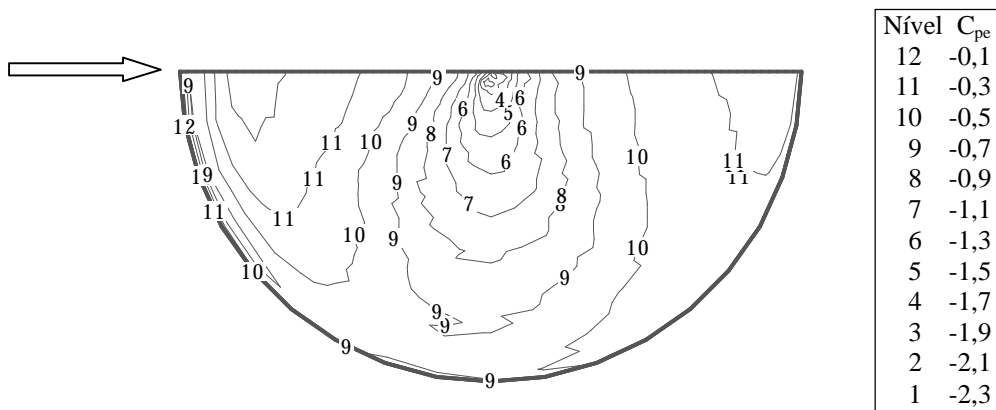
**TABELA 28 – Valores dos coeficientes de arrasto para silos cilíndricos com relação H/D = 0,5 e 1,0**

Planta	Re x 10 <sup>5</sup>	H/D		
		0,5	1,0	
	Liso ≤ 3,5 ≥ 4,2	0,7 0,5	0,7 0,5	
	Com colunas de altura = 0,01D	Todos valores	0,6	0,6
	Com colunas de altura = 0,02D	Todos valores	0,7	0,7
	Com colunas de altura = 0,08D	Todos valores	0,8	0,8

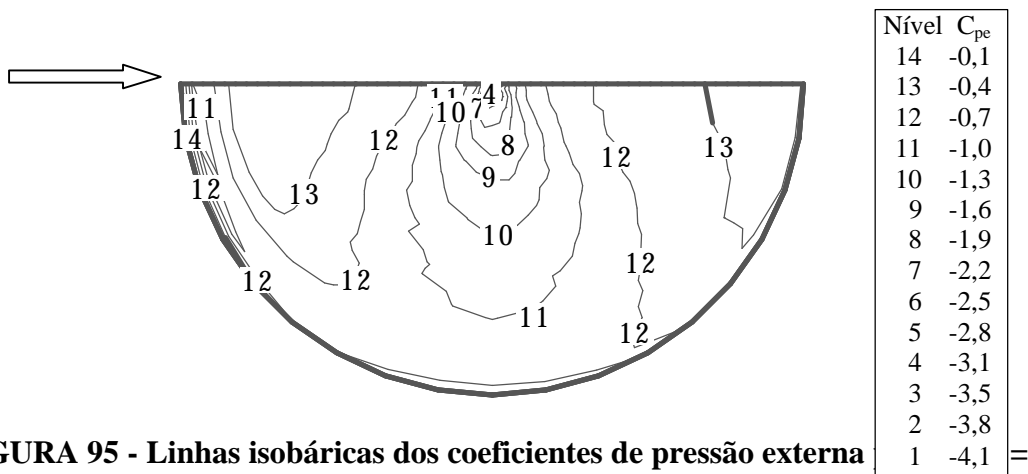
A norma brasileira não apresenta valores para os coeficientes de pressão externa na cobertura cônica, como é o presente caso dos silos cilíndricos. Com base nos resultados obtidos são propostas as distribuições dos coeficientes de pressão externa em coberturas cônicas, que estão apresentadas nas figuras 93, 94, 95 e 96. Estas distribuições servem para o cálculo das forças localizadas nas coberturas cônicas lisas e nervuradas com relação de altura 0,01.b.



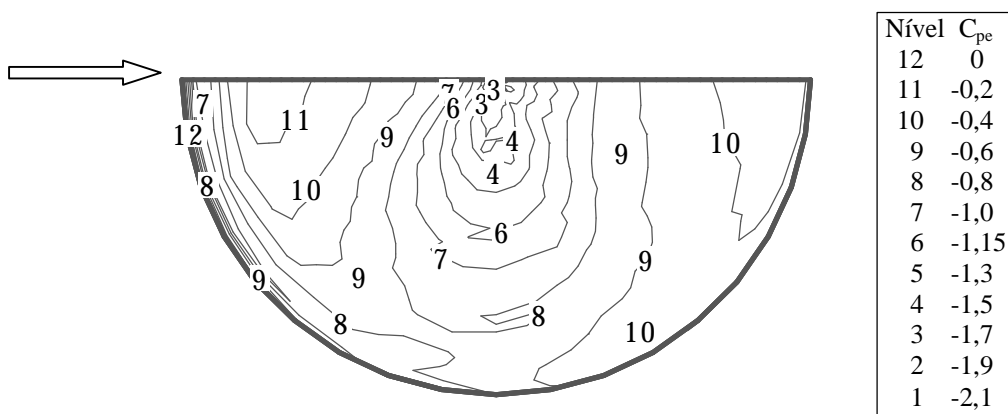
**FIGURA 93 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para H/D = 0,5 e superfície cônica lisa com inclinação 27°**



**FIGURA 94 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para  $H/D = 0,5$  e superfície cônica com saliências e inclinação  $27^\circ$**



**FIGURA 95 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para  $H/D = 1,0$  e superfície cônica lisa com inclinação  $27^\circ$**



**FIGURA 96 - Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para  $H/D = 1,0$  e superfície cônica com saliências e inclinação  $27^\circ$**

Na tabela 29 são propostos os coeficientes de arrasto e de sustentação para a determinação das forças globais que atuam nas coberturas cônicas.

**TABELA 29 - Valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação para as coberturas cônicas de inclinação 27° (b/D=1/4) com relação H/D = 0,5 e 1,0**

Superfície	H/D	C <sub>a</sub>	C <sub>s</sub>
Lisa	0,5	-0,02	-0,55
Nervurada 0,01.b	0,5	0,03	-0,50
Lisa	1,0	-0,03	-0,75
Nervurada 0,01.b	1,0	-0,02	-0,65

Pelos ensaios do modelo flexível de relação H/D = 1,0 foram avaliadas as configurações de deformações da casca cilíndrica à ação do vento e a conclusão é que o corpo do silo necessita de anéis de enrijecimento ao longo da altura.

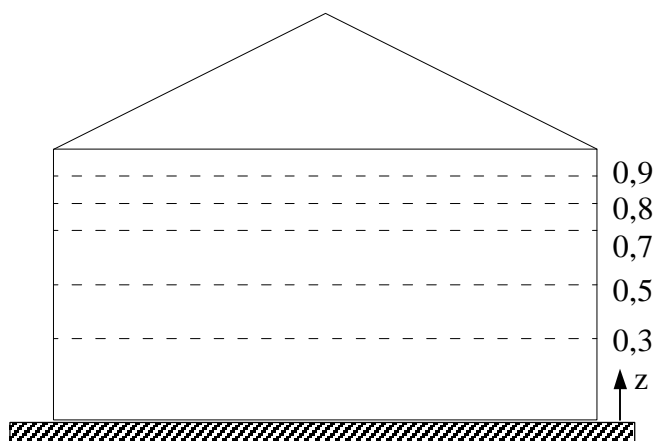
A asserção é feita com base na rigidez corpo cilíndrico, que foi reduzida com base em uma velocidade do vento no protótipo igual a 30 m/s. Como os primeiros movimentos ocorreram a 11,2 m/s, então o corpo do silo somente com colunas externas não resiste às forças do vento.

O deslocamento à velocidade de 11 m/s é tolerável para o caso em que o conjunto chapas corrugadas e colunas resista a deslocamentos da ordem de L/120. De outro modo, sendo o conjunto sensível a grandes deslocamentos (limite dado por L/180), já há a necessidade de enrijecer o costado do silo em torno do perímetro, ou seja, conectar anéis enrijecedores às colunas.

O modo de deflexão é de 1 semi-onda na direção da geratriz do cilindro para as velocidades testadas nos modelos. Para velocidades de até 6,0 m/s ocorrem 2 semi-ondas no perímetro e para velocidades próximas a 6,9 m/s são 4 semi-ondas no perímetro do corpo cilíndrico flexível.

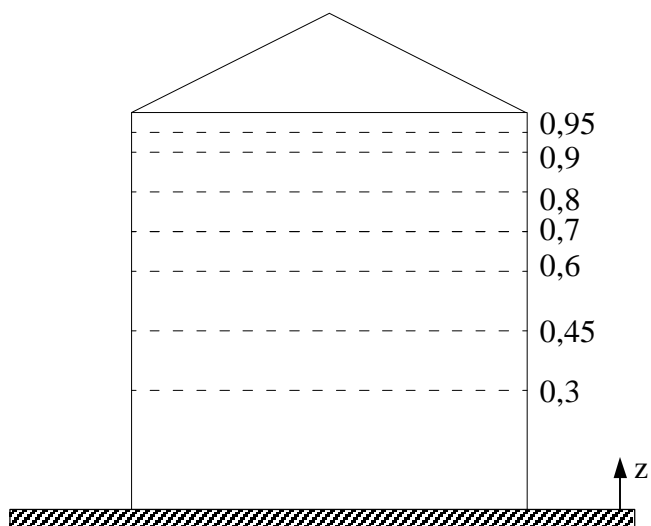
Com estas constatações e também com a fundamentação dos estudos de BRIASSOULIS & PECKNOLD (1986) e na formulação teórica de BRUSH & ALMROTH (1975), sugere-se que sejam conectados anéis de seção tubular às colunas, para que a estrutura do silo suporte maiores velocidades do vento.

Para os silos com relação H/D próxima a 0,5 é sugerido que sejam colocados anéis enrijecedores nas posições  $z/H = (0,3; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9)$  indicados na figura 97.



**FIGURA 97 – Posições  $z/H$  dos anéis no silo  $H/D = 0,5$**

Para o silo de relação H/D próxima a 1,0 as posições dos anéis são  $z/H = (0,3; 0,45; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95)$  e estão indicadas na figura 98. O maior número de anéis é justificado pelo alteamento da estrutura.



**FIGURA 98 - Posições  $z/H$  dos anéis no silo  $H/D = 1,0$**

Com base na teoria fornecida em BRUSH & ALMROTH (1975) espera-se que esta medida seja suficiente para velocidades de até 50 m/s.

É vantajoso o posicionamento das colunas externamente, porque reduz pela metade as pressões nas laterais do corpo cilíndrico. Um ônus seria o acréscimo da força de arrasto, mas isto não aumenta a ancoragem do silo significativamente em relação ao benefício de se ter um alívio das pressões nas laterais do silo.

Supondo-se que o silo esteja com colunas externas mas não seja enrijecido com anéis, estima-se que a perda de estabilidade ocorreria para uma pressão crítica igual a  $375 \text{ N/m}^2$ , que, nas condições de terreno estabelecidas para os protótipos, equivale a  $V_o = 25 \text{ m/s}$ . Rememorando-se que o modelo flexível desenvolve um comportamento de deflexões máximas à velocidade de  $6,9 \text{ m/s}$ , o que dá  $14 \text{ m/s}$  em escala real, ou  $120 \text{ N/m}^2$ , considera-se que é preciso rever essa formulação. A título de entendimento do efeito das colunas, caso fosse considerado o cilindro somente com as chapas corrugadas, a pressão crítica seria igual a  $314 \text{ N/m}^2$ . Caso as chapas não fossem corrugadas, a pressão crítica no cilindro seria  $6,5 \text{ N/m}^2$ .

Com os anéis enrijecedores posicionados como sugerido na figura 98, praticamente se garante a integridade da estrutura, porque para a formulação de BRUSH & ALMROTH (1975) e os anéis o protótipo 1,0 resistiria até uma pressão de  $5500 \text{ Pa}$ , muito acima da pressão máxima de  $750 \text{ Pa}$  exercida pelo vento no cilindro nervurado, para uma velocidade básica de  $40 \text{ m/s}$ .

Os testes no modelo flexível permitiram avaliar a formulação teórica para uma casca cilíndrica com colunas e anéis. O comportamento da casca somente com colunas foi simulado no túnel de vento, mas as deflexões começaram a  $5,6 \text{ m/s}$  e, sem dúvida, para  $6,9 \text{ m/s}$  os deslocamentos extrapolaram a capacidade da estrutura, como ficou explicado no item interpretação da resposta do modelo flexível.

Embora os estudos realizados esclareçam o comportamento do cilindro com colunas externas e demonstre que há a necessidade de um enrijecimento com anéis ao longo da altura, é interessante em estudos futuros testar os modelos flexíveis com variação do número de anéis posicionados a alturas diferentes.

A programação dos ensaios poderá incluir os modelos rígidos para as medidas das pressões, e os modelos flexíveis confeccionados em poliéster e polietileno, e também em alumínio. O objetivo é que sejam comparadas as respostas dos modelos de plástico com os modelos metálicos e, posteriormente, avaliadas as pressões do vento que provoquem o amassamento do costado do modelo metálico.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

**Área:** Mecânica de Estruturas

**ANDRADE JUNIOR, L.J. (1998)** Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos. São Carlos. 137p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

**ANSOURIAN, Peter (1985)** Stability under wind loading. In: Design of steel bins for the storage of bulk solids. Editor J.M. Rotter. School of Civil and Mining Engineering, The University of Sydney.

**ANSOURIAN, Peter. (1992)** “*On the Buckling Analysis and Design of Silos and Tanks*”. Journal of Constructional Steel Research, 23, 273-294

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT (1989)** NBR 10735 - Chapas de aço de alta resistência mecânica zincadas continuamente por imersão a quente. ABNT, 09/1989, EB 1966.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT (2000)** *Texto-base para norma brasileira “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio”*, abril de 2000.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT (1990)** NBR-11162 - Silos cilíndricos para grãos vegetais. ABNT, 01/1990, TB-374.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT (1990)** NBR-11165 - Componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais. ABNT, 01/1990, TB-377.

**BECKER, Herbert; GERARD, George (1962)** “*Elastic Stability of Orthotropic Shells*”. Journal of the Aerospace Sciences, vol. 29, No 5.

**BRIASSOULIS, Demetres. (1986)** “*Equivalent Properties of Corrugated Sheets*”. Computers & Structures, vol. 23, p 129-138.

- BRIASSOULIS, D.; PECKNOLD, D.A.** <sup>1</sup>(1986) “Anchorage Requirements for Wind-Loaded Empty Silos”. J. of Struct Engng. V 112 n 2 Feb 1986, p 308-325.
- BRIASSOULIS, D.; PECKNOLD, D.A.** <sup>2</sup>(1986) “Behaviour of Empty Steel Grain Silos under Wind Loading. Part 1: The Stiffened Cylindrical Shell”. Eng. Struct. V 8 n 4 Oct 1986, p 260-275
- ESTEVEZ JR; Paulo (1989)** *Silos Metálicos de Chapas Corrugadas*. Dissertação de Mestrado defendida junto à Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
- ISO 11697 (1997)** – *Bases for design of structures – Loads due to bulk materials*. The International Organization for Standardization – Case Postale 58, CH-1211, Genève – Switzerland.
- JONES, Robert; WYKES, Catherine (1989).** *Holographic and Speckle Interferometry*. 2<sup>nd</sup> Edition. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- SIROCHI, R.S.; KRISHNA, H.C. Radha (1991)** *Mechanical Measurements*. John Wiley & Sons. New Delhi, India.
- RAVENET, Juan (1992)** *Silos*. Barcelona: IMGESA, 508p.
- TRAHAIR, N.S.; ABEL, A.; ANSOURIAN, P.; IRVINE, H.M.; ROTTER, J.M. (1983)** Structural Design of steel bins for bulk solids. Australian Institute of Steel Construction LTD, Sydney
- UEMATSU, Yasushi; UCHIYAMA, Kazuo (1985)** Deflection and buckling behavior of thin, circular cylindrical shells under wind loads. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, No 18, p 245-261.

Área: Engenharia do Vento

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1990)** *NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações*. 84 p., Rio de Janeiro.
- ACKERET, J. (1934)** Winddruck-Untersuchungen an einem Gasbehälter-Modell. Escher-Wyss Mitteilungen, 7(5):115-20, Sept./Okt.
- BLESSMANN, Joaquim (1983)** *Aerodinâmica das Construções*, Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS; Brasília, CNPq.
- COOK, N. J. (1982)** Simulation techniques for short test-section wind tunnels: roughness, barrier and mixing-device methods. Ed. Timothy A. Reinhold.

Cambridge University Press, Proceedings of the International Workshop on wind Tunnel Modelling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications, Gaithersburg, Maryland, USA, April.

**DALLEY, S.; RICHARDSON, G. (1992)** "Reference static pressure measurements in wind tunnels". J. of Wind Engng. and Ind. Aerodynamics, 41-44, p. 909-920.

**DAVENPORT, A.G.; SURRY, D.J. (1974)** The pressures on low rise structures in turbulent wind. In: Canadian Structural Engineering Conference, Canada, 1974.

**ENGINEERING SCIENCE DATA UNIT- ESDU (1974)** *Wind Engineering Data Sheet 74031*. Item no 92032, ESDU International London, 1974.

**ENGINEERING SCIENCE DATA UNIT- ESDU (1995)** *Computer program for wind speeds and turbulence properties: flat or hilly sites in terrain with roughness changes*. Item no 92032, ESDU International London, 1995.

**FANG, C.; SILL, B. L. (1992)** "Aerodynamic roughness length: Correlation with roughness elements": Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. v 41 n 1-3 Oct, p 449-460.

**FARELL, Cesar; IYENGAR, K.S. (1999)** "Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 79, 11-35.

**FLACHSBART, O. (1932)** *Winddruck auf Gasbehälter*. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, (4):134-8.

**FREYMUTH, Peter (1977)**. "Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers". Scientific Instruments Journals of Physics: E, 10, 705-710.

**MACDONALD, P.A.; KWOK, K.C.S.; HOLMES, J.D. <sup>1</sup>(1988)** "Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures". J of Wind Engng and Ind. Aerodynamics, vol 31, p 165-187

**PRIS, M.R. (1960)** *Études Aérodynamiques, 3-10*. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, 1960-67. n 155, 163, 164, 170, 181, 186, 202, 26, 240.

**SABRANSKY, I.J.; MELBOURNE, W.H. (1987)** "Design pressure distribution on circular silos ". J. of Wind Engng and Ind Aerodynamics, vol 26, p 65-84.

- SIMIU, Emil; SCANLAN, Robert H. (1986)** *Wind Effects on Structures*. Wiley-Interscience, 2<sup>nd</sup> ed, 589 pág., USA.
- Área:** Análise dimensional e Teoria da Semelhança e de Modelos Físicos
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE (1997)** *Manual of Practice for Wind Tunnel Studies of Building and Structures*. Final Printing, June.
- ANDRADE JR, L. Jorge de; CALIL JR, Carlito; CANEIRO, Fernando L.L.B. (2000)** “Análise dimensional de modelos de silos em túnel de vento”. XXIX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Montevideú.
- BENDAT, Julius; PIERSOL, Allan G. (1971)** *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley-Interscience. New York.
- BLESSMANN, Joaquim (1995)** *O Vento na Engenharia Estrutural*, Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- CARNEIRO, Fernando L.L.B. (1996)** *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. 2<sup>a</sup> Ed., Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- FANG, C.; SILL, B.L. (1992)** “Aerodynamic roughness length: correlation with roughness elements”, *J. Wind Engng Ind Aerodynamics*, v 41,1-3 Oct, p 449-460.
- KOBAYASHI, Albert S. (1993)** *Handbook on Experimental Mechanics*. Publicado por SEM, 2<sup>nd</sup> ed, Chapter 15 “Similitude, Modeling and Dimensional Analysis”, by Donald F. Young, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
- KOLOUŠEK, V.; PIRNER, M.; FISCHER, O.; NÁPRSTEK, J. (1984)** *Wind Effects os Civil Engineering Structures*. Elsevier, co-edição com ACADEMIA, Praga, Tchecoslováquia.
- WAENY, José Carlos de Castro (1992)** *Controle total da qualidade em metrologia*. Makron Books, McGraw-Hill, São Paulo, SP.
- WANG, Zhao-Yin; PLATE, Erich J.; RAU, Matthias; KEISER, Rolf (1996)** “Scale effects in wind tunnel modelling”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. v 61 n 2-3 Jul, p 113-130