

# **AÇÃO DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS**

**Daniela Grau Makowski**

Porto Alegre  
Novembro 2004

**DANIELA GRAU MAKOWSKI**

**AÇÃO DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre  
Novembro 2004

**DANIELA GRAU MAKOWSKI**

**AÇÃO DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 10 de novembro de 2004

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

Prof. Mario José Paluch  
Doutor pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
orientador

Prof. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Moacir Kripka (UPF)**  
Doutor pela USP-EESC

**Prof.a Ângela Borges Masuero (UFRGS)**  
Doutora pela UFRGS

**Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)**  
Doutor pela UFRGS

Aos meus pais

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e Prof. Mario José Paluch pela atenção e dedicação.

A toda equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, pelo auxílio e atenção dedicados durante os ensaios.

Aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo durante o curso, principalmente aos amigos Leandro Fleck Fadel Miguel e Mario Gustavo Klaus de Oliveira pelo apoio fundamental para a obtenção deste título. Ao colega Daniel Sias pela constante ajuda durante esta dissertação.

A minha família pelo carinho e paciência, e pelo incentivo financeiro, que possibilitou o desenvolvimento e a conclusão desta dissertação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo conhecimento transmitido.

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida em parte do curso.

## RESUMO

MAKOWSKI, D. G. Ação do vento em coberturas isoladas. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Coberturas isoladas são muito sensíveis a ação do vento e devem estar estruturalmente projetadas para suportar forças em duas direções: forças de sobrepressão e de sucção que se alternam conforme a incidência do vento.

O objetivo deste trabalho é estudar a distribuição de pressões em um modelo de cobertura isolada a duas águas através de ensaios realizados em túnel de vento, verificando a influência da escala do modelo, o efeito do tipo de escoamento nas ações estáticas exercidas pelo vento e a influência da espessura do telhado do modelo.

Os coeficientes de pressão foram determinados através de ensaios em túnel de vento de modelos de cobertura isolada em diferentes escalas: 1:75, 1:100 e 1:300. Foram obtidos coeficientes de pressão externa e interna para diferentes tipos de escoamento e ângulos de incidência de 0°, 45° e 90°.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados conclui-se que a escala do modelo exerce uma forte influência nos resultados para todos os ângulos de incidência do vento e tipos de escoamento, sendo o parâmetro que mais influencia nos resultados em modelos reduzidos.

Uma reprodução aceitável das ações estáticas do vento exige o emprego de um modelo com escala maior que 1:100 e que o ensaio seja com escoamento deslizando e turbulento.

Palavras-chave: ensaio em túnel de vento, cobertura isolada.

## ABSTRACT

MAKOWSKI, D. G. Wind action on canopy roofs. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Canopy roofs are very sensitive to the action of the wind and these frames should be projected to support forces exerted on the top and bottom faces that alternate according to the wind incidence.

The purpose of this assignment is to study mean pressures obtained in wind tunnel tests on duo-pitch canopy roof, observing the influence of the scale models, the wind simulations and the model relative thickness.

The mean pressure coefficients were determined from wind tunnel tests on three scale models: 1:75, 1:100 and 1:300. Internal and external mean pressures coefficients were obtained with wind tunnel tests under three wind directions: 0°, 45° and 90°.

The results show that the scale model appears to be an important factor when modeling pressures on this kind of structures.

An acceptable reproduction of wind simulations requires a scale model bigger than 1:100 and a boundary layer simulation appropriate.

Key-words: wind tunnel test, canopy roof.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	20
1.3	CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA AÇÃO DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS PLANAS A DUAS ÁGUAS	21
1.4	MODELOS DE NORMAS	23
1.4.1	Definição dos coeficientes aerodinâmicos empregados pelas normas	23
1.4.2	Norma Brasileira, NBR 6123 (1988)	27
1.4.3	Norma Francesa NV-65 (1980)	30
1.4.4	Norma da Convenção Européia de Construções Metálicas, CECM (1979)	35
1.4.5	Norma da Suécia (1975)	36
2	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	37
2.1	METODOLOGIA	37
2.2	MODELOS	38
2.3	TÚNEL DE VENTO	43
2.4	ESCOAMENTOS	46
2.5	NÚMERO DE REYNOLDS	49
2.6	ENSAIOS	50
2.7	PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	52
3	RESULTADOS	54
3.1	COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA (SUPERIOR)	56
3.2	COEFICIENTES DE PRESSÃO INTERNA (INFERIOR)	62
3.3	INDICAÇÕES DE NORMAS	69
3.3.1	Norma Francesa, NV-65 (1980)	69
3.3.2	Norma da Convenção Européia de Construções Metálicas, CECM (1979)	71
3.3.3	Norma da Suécia (1975)	71
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4.1	EFEITO DO TIPO DE ESCOAMENTO NAS AÇÕES ESTÁTICAS EXERCIDAS PELO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS A DUAS ÁGUAS	73



4.1.1	Pressão externa (superior)	73
4.1.2	Pressão interna (inferior)	74
4.2	INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO TELHADO DO MODELO NOS RESULTADOS DE ENSAIOS EM TUNEL DE VENTO	75
4.3	INFLUÊNCIA DA ESCALA DO MODELO NOS RESULTADOS DE ENSAIOS EM TUNEL DE VENTO	75
4.4	APLICABILIDADE DO MODELO SUGERIDO PELA NORMA BRASILEIRA PARA A DETERMINAÇÃO DA AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS	77
4.5	APLICABILIDADE DOS MODELOS DE NORMAS APRESENTADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS	77
5	CONCLUSÕES	78
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
	Anexo 1 – Resultados obtidos nos ensaios	82
1.1	RESULTADOS OBTIDOS	83
1.1.1	Coeficientes de pressão externa (superior)	83
1.1.2	Coeficientes de pressão interna (inferior)	96
	Anexo 2 – Detalhes dos Modelos em Fotografias	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: coeficientes de pressão em coberturas isoladas a uma água plana	28
Tabela 2: coeficientes de pressão em coberturas isoladas a duas águas planas	28
Tabela 3: valores de $\gamma$ em função de $\lambda$ , tirados da escala funcional da NV-65, para coberturas planas a uma água	31
Tabela 4: valores de $\gamma$ em função de $\lambda$ , tirados da escala funcional da NV-65, para coberturas planas a duas águas	33
Tabela 5: características dos modelos	39
Tabela 6: diâmetros relativos $\varphi_D$ e espessuras relativas $\varphi_{Th}$ dos modelos	41
Tabela 7: área frontal efetiva do modelo (direção do vento de $90^\circ$ ) e relação de bloqueio	46
Tabela 8: intensidade ( $I_1$ ) e macroescala ( $L_1$ ) da componente longitudinal da turbulência para os ensaios dos modelos 1, 2, 3 e 4	49
Tabela 9: número de Reynolds calculado para os ensaios de pressão externa realizados em túnel de vento para os modelos 1, 2, 3 e 4	50
Tabela 10: número de Reynolds calculado para os ensaios de pressão interna realizados em túnel de vento para os modelos 1, 2, 3 e 4	50
Tabela 11: número de medições de pressão para cada modelo	52
Tabela 12: coeficientes de forma para um ângulo de incidência do vento de $90^\circ$ , correspondente aos ensaios em túnel de vento, à indicação da norma brasileira e aos ensaios realizados <i>in situ</i> , por Robertson, Hoxey e Moran (1985)	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: posto de serviço em Santa Maria, RS (BLESSMANN, 2001)	19
Figura 2: posto de serviço em Canoas, RS (BLESSMANN, 2001)	19
Figura 3: posto de serviço em Osório, RS (BLESSMANN, 2001)	20
Figura 4: protótipo utilizado nos ensaios de Robertson, Hoxey e Moran (1985)	22
Figura 5: equivalência de coberturas, conforme NV-65	32
Figura 6: coeficiente $c$ nas arestas horizontais de coberturas planas a uma água (NV-65)	32
Figura 7: coeficiente $c$ nas arestas horizontais de coberturas planas a duas águas (NV-65)	34
Figura 8: coeficientes de força e ponto de aplicação (CECM/1979)	36
Figura 9: protótipo estudado por Robertson, Hoxey e Moran (1985), dimensões em metros	38
Figura 10: modelo 4 com tomadas de pressão externa	39
Figura 11: modelo 3 com tomadas de pressão externa	39
Figura 12: modelo 2 com tomadas de pressão externa e simuladores de rugosidade do terreno	40
Figura 13: modelo 1 com tomadas de pressão externa	40
Figura 14: dimensões [mm] do modelo 1 e localização das tomadas de pressão interna e externa	42
Figura 15: dimensões [mm] do modelo 2 e localização das tomadas de pressão interna e externa	42
Figura 16: dimensões [mm] dos modelos 3 e 4 e localização das tomadas de pressão interna e externa	43
Figura 17: túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann	44
Figura 18: circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (Blessmann, 1990a)	44
Figura 19: características do vento uniforme e suave: (a) perfil de velocidades médias e (b) intensidade da componente longitudinal da turbulência	47
Figura 20: características do vento deslizante e turbulento com expoente $p = 0,11$ : (a) perfil de velocidades médias, (b) intensidade da componente longitudinal da turbulência e (c) macroescala da componente longitudinal da turbulência	48

Figura 21: características do vento deslizante e turbulento com expoente $p = 0,23$ : (a) perfil de velocidades médias, (b) intensidade da componente longitudinal da turbulência e (c) macroescala da componente longitudinal da turbulência	48
Figura 22: referência para cada ângulo de incidência do vento	51
Figura 23: pressões externas medidas para o modelo 1, escoamento uniforme e suave	51
Figura 24: pressões externas medidas para o modelo 1, escoamento uniforme e turbulento	52
Figura 25: convenção de sinais adotada para os coeficientes de pressão: (a) coeficientes positivos (+) e (b) coeficientes negativos (-)	53
Figura 26: distribuição das tomadas de pressão externa da cobertura em escala real ensaiada por Robertson, Hoxey e Moran (1985)	54
Figura 27: distribuição das tomadas de pressão interna da cobertura em escala real ensaiada por Robertson, Hoxey e Moran (1985)	55
Figura 28: coeficientes de pressão externa para escoamento suave com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	56
Figura 29: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	57
Figura 30: coeficientes de pressão externa para escoamento suave com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	58
Figura 31: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	59
Figura 32: coeficientes de pressão externa para escoamento suave com ângulo de incidência de $90^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	60
Figura 33: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $90^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	61
Figura 34: coeficientes de pressão interna para escoamento suave com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	62
Figura 35: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	63
Figura 36: coeficientes de pressão interna para escoamento suave com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	64
Figura 37: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	65

Figura 38: coeficientes de pressão interna para escoamento suave com ângulo de incidência de 90°, modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	66
Figura 39: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de 90°, modelos 4, 3, 2, 1 e escala real	67
Figura 40: sentidos positivos dos coeficientes de forma	68
Figura 41: coeficientes de pressão indicados pela Norma Francesa para ângulo de incidência do vento de 90°	70
Figura 42: coeficientes de pressão indicados pela Norma Francesa para ângulo de incidência do vento de 45°	70
Figura 43: coeficientes de força indicados pela Norma CECM para ângulo de incidência do vento de 90°	71
Figura 44: coeficientes de pressão indicados pela Norma da Suécia para ângulo de incidência do vento de 45°	72
Figura 41: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de 0°, modelos 1, 2, 3 e 4	84
Figura 42: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de 45°, modelos 1, 2, 3 e 4	85
Figura 43: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de 90°, modelos 1, 2, 3 e 4	86
Figura 44: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de 0°, modelos 1, 2, 3 e 4	87
Figura 45: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de 45°, modelos 1, 2, 3 e 4	88
Figura 46: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de 90°, modelos 1, 2, 3 e 4	89
Figura 47: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,11$ com ângulo de incidência de 0°, modelos 1, 2, 3 e 4	90
Figura 48: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,11$ com ângulo de incidência de 45°, modelos 1, 2, 3 e 4	91
Figura 49: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,11$ com ângulo de incidência de 90°, modelos 1, 2, 3 e 4	92
Figura 50: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de 0°, modelos 1, 2, 3 e 4	93

Figura 51: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	94
Figura 52: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	95
Figura 53: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	96
Figura 54: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	97
Figura 55: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	98
Figura 56: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	99
Figura 57: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	100
Figura 58: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	101
Figura 59: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,11$ com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	102
Figura 60: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,11$ com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	103
Figura 61: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,11$ com ângulo de incidência de $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	104
Figura 62: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	105
Figura 63: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	106
Figura 64: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento $p = 0,23$ com ângulo de incidência de $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4	107
Figura 65: modelo 1 (escala 1:75), com tomadas de pressão externa, com simulador do escoamento deslizante e turbulento com $p = 0,23$	109
Figura 66: modelo 1 (escala 1:75), com tomadas de pressão interna	109
Figura 67: modelo 1 (escala 1:75), com tomadas de pressão interna	110

Figura 68: modelo 2 (escala 1:100), com tomadas de pressão externa	110
Figura 69: modelo 2 (escala 1:100), com tomadas de pressão interna	111
Figura 70: modelo 3 (escala 1:300 e $e = 2,0mm$ ), com tomadas de pressão externa	111
Figura 71: modelo 3 (escala 1:300 e $e = 2,0mm$ ), com tomadas de pressão interna	111
Figura 72: modelo 4 (escala 1:300 e $e = 0,5mm$ ), com tomadas de pressão externa	112
Figura 73: modelo 4 (escala 1:300 e $e = 0,5mm$ ), com tomadas de pressão interna	112

# SÍMBOLOS

## Letras Romanas Maiúsculas

A: área da superfície plana

$A_{\text{túnel}}$ : área da seção transversal do túnel de vento

$A_e$ : área frontal efetiva

C ou  $C_p$ : coeficiente de forma total

$C_a$ : coeficiente de arrasto

$C_e$ : coeficiente de forma externo

$C_f$ : coeficiente de força

$C_i$ : coeficiente de forma interno

$C_s$ : coeficiente de sustentação

F: força devida ao vento

$F_a$ : força de arrasto

$F_{at}$ : força de atrito

$F_e$ : força na superfície plana externa

$F_i$ : força na superfície plana interna

$F_s$ : força de sustentação

$I_1$ : intensidade da componente longitudinal da turbulência

$L_1$ : macroescala da componente longitudinal da turbulência



Re: número de Reynolds

T: temperatura

V: velocidade média do vento

$V_{ref}$ : velocidade média do vento em uma altura de referência

### **Letras Romanas Minúsculas**

$c_p$ : coeficiente de pressão total

$c_{pe}$ : coeficiente de pressão externa

$c_{pi}$ : coeficiente de pressão interna

e: espessura do telhado

h: altura livre entre o piso e o nível da aresta horizontal mais baixa da cobertura

$k_0$ : constante experimental do túnel de vento

$l_2$ : profundidade da cobertura

p: expoente da curva de potência

$p_a$ : pressão atmosférica

q: pressão dinâmica de referência

r: relação de bloqueio

### **Letras Gregas Maiúsculas**

$\Delta p$ : pressão diferencial na tomada da superfície do modelo

$\Delta p_a$ : diferença da pressão estática entre os dois anéis piezométricos no interior do túnel de vento

$\Delta p_e$ : pressão estática efetiva média externa

$\Delta p_i$ : pressão estática efetiva média interna

### **Letras Gregas Minúsculas**

$\alpha$ : ângulo de incidência do vento

$\phi$ : diâmetro dos pilares

$\phi_D$ : diâmetro relativo

$\phi_{Th}$ : espessura relativa

$\theta$ : ângulo de inclinação da cobertura

$\rho$ : massa específica do ar



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Coberturas isoladas são sustentadas por suportes de dimensões reduzidas e não possuem fechamentos ou paredes permanentes. A ação do vento é exercida diretamente sobre as faces superior e inferior da cobertura. O escoamento do vento através da parte inferior da cobertura pode ser bloqueado em forma parcial ou total, mudando a forma do carregamento da estrutura, devendo ser previsto no projeto.

Hoje em dia, como resultado do desenvolvimento da tecnologia dos materiais e das inovações nos projetos estruturais as coberturas resultam mais leves, flexíveis e com vãos cada vez maiores. Isto as torna mais sensíveis à ação do vento, e, conseqüentemente, é de fundamental importância um conhecimento mais preciso do carregamento do vento neste tipo de estrutura.

A maioria dos acidentes causados pelo vento ocorre em construções leves, com grandes vãos livres, tais como hangares, pavilhões de feiras e de exposições, pavilhões industriais, depósitos de cereais, armazéns portuários, pavilhões para fins agrícolas e pecuários, entre outros. Acidentes também são causados por parte de projéteis lançados pelo vento, danificando edificações e veículos e atingindo pessoas e animais.

Apesar do conhecimento existente sobre o fenômeno, diversos acidentes ocorrem nos dias de hoje. As figuras 1, 2 e 3 mostram alguns acidentes causados pelo vento ocorridos no Rio Grande do Sul em postos de serviço.



Figura 1: posto de serviço em Santa Maria, RS (BLESSMANN, 2001)



Figura 2: posto de serviço em Canoas, RS (BLESSMANN, 2001)



Figura 3: posto de serviço em Osório, RS (BLESSMANN, 2001)

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo da ação estática do vento em coberturas isoladas a duas águas através de ensaios realizados em túnel de vento.

Os objetivos específicos deste trabalho são estudar:

- A influência da escala do modelo de cobertura isolada a duas águas nos resultados de ensaios em túnel de vento;
- O efeito do tipo de escoamento nas ações estáticas exercidas pelo vento em coberturas isoladas a duas águas;
- A influência da espessura do telhado do modelo nos resultados de ensaios em túnel de vento;
- Verificar o modelo sugerido pela Norma Brasileira NBR 6123, para a determinação da ação estática do vento em coberturas isoladas.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA AÇÃO DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS PLANAS A DUAS ÁGUAS

Blessmann (1985) refere-se aos carregamentos devidos a ação do vento em coberturas isoladas como, *“para nenhuma outra forma construtiva os resultados encontrados na literatura, principalmente nas normas de ação do vento, apresentam valores tão díspares. Em certos casos, para uma mesma cobertura, ora é indicada uma força em um sentido, ora em sentido oposto, ora em ambos os sentidos,...”*.

Os pesquisadores pioneiros da ação do vento em construções civis foram Irminger e Nokkentved que, em 1936, contribuíram com o estudo de um modelo de cobertura isolada a duas águas planas iguais (BLESSMANN, 1985).

Entre 1980 e 1983, Oxford Wind Engineering Research Group executou um amplo programa experimental. Diferentes modelos de coberturas isoladas a uma e a duas águas foram estudadas com diferentes arranjos de obstruções e alguns sem obstruções. Foram medidas pressões e coeficientes de forma médios e flutuantes. Os resultados destes experimentos foram incorporados nas normas Australiana e Britânica, entre outras (GUMLEY, 1984).

Em 1984, Gumley (1984) estudou coberturas isoladas a uma e a duas águas planas. Foram avaliadas as pressões extremas, e verificada a importância dos ensaios experimentais para a determinação dos efeitos de obstruções colocadas sob ou junto à cobertura nos coeficientes de pressão. Apresentou resultados de ensaios em túnel de vento para coberturas isoladas e determinou os efeitos de obstrução parcial ou total do escoamento, recomendando a consideração do efeito de obstruções para futuras normas. Ressaltou ainda que para verificar a dependência dos resultados da intensidade de turbulência alguns testes deveriam ser repetidos simulando uma camada limite natural com diferentes rugosidades.

Investigações independentes foram feitas por Robertson e Moran (1986) em escala real em duas coberturas isoladas de diferentes geometrias, em modelos em diferentes túneis de vento, para a mesma escala, e em modelos de diferentes escalas, em mesmo túnel de vento. Em todos os casos foram estudados os efeitos da geometria da cobertura, da orientação do vento e de arranjos de obstruções situadas sob a cobertura. Algumas diferenças significativas

foram encontradas entre os resultados dos ensaios realizados em escala real e em modelos em túnel de vento. Estes estudos fornecem dados para a comparação entre estes resultados.

Em ensaios realizados em modelo de cobertura isolada a duas águas em túnel de vento, Ginger e Letchford (1992) identificaram as regiões que sofrem as maiores pressões. Concluíram que estas grandes pressões são causadas pelo mecanismo de separação do escoamento da estrutura e pela formação de vórtices delta-cônicos. Segundo Letchford e Ginger (1992), o conhecimento da detalhada distribuição de pressões permite a identificação dos gradientes de pressões mais significativos e deste modo fornece um melhor entendimento da área de influência do mecanismo de escoamento associado, do bulbo de separação do escoamento e da formação de vórtices delta-cônicos.

Natalini, Mariguetti e Natalini (2002) apresentaram resultados de pressões médias em coberturas isoladas obtidas em testes realizados no túnel de vento da Universidad Nacional Del Nordeste, Argentina. O objetivo dos ensaios era encontrar as melhores condições de modelagem neste túnel para estudar pressões médias. Coeficientes de pressão média interna e externa foram testados em dois modelos com escalas 1:100 e 1:150 e com duas simulações de camada limite. A existência de uma escala mínima para a modelagem e a influência da intensidade de turbulência foram questionadas em seus ensaios. Foram tomados como referência os valores obtidos em escala real (figura 4) em um estudo realizado por Robertson, Hoxey e Moran (1985).



Figura 4: protótipo utilizado nos ensaios de Robertson, Hoxey e Moran (1985)



Nas diversas pesquisas realizadas ao longo dos anos, percebe-se uma grande disparidade dos valores dos coeficientes de pressão para projetos de coberturas isoladas (BLESSMANN, 1990b). Ensaio foram realizados para a verificação do fator de escala, para comparação de dados obtidos entre escalas diferentes, entre túneis e ensaios realizados em escala real. Alguns parâmetros para projeto de coberturas isoladas ainda não estão bem definidos. Segundo Natalini, Mariguetti e Natalini (2002), a determinação de um fator de escala mínimo de um modelo para evitar distorções nos resultados permanece uma questão em aberto. Robertson e Moran (1986) mostraram a existência de discrepâncias significativas entre os resultados obtidos de ensaios em diferentes túneis de vento e também em ensaios com modelos de diferentes escalas. Através de um estudo em escala real, Robertson, Hoxey e Moran (1985) identificaram a importância da consideração de obstruções colocadas sob as coberturas.

## 1.4 MODELOS DE NORMAS

A seguir serão apresentados tópicos de normas encontradas na bibliografia e a definição dos coeficientes aerodinâmicos empregados.

### 1.4.1 Definição dos coeficientes aerodinâmicos empregados pelas normas

As definições dos coeficientes aerodinâmicos serão apresentadas a seguir.

- Coeficientes de pressão:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad (\text{equação 1})$$

$$c_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q} \quad (\text{equação 2})$$

$$c_p = c_{pe} - c_{pi} \quad (\text{equação 3})$$

onde:

$c_{pe}$  – coeficiente de pressão externa (ou na face superior da cobertura);

$c_{pi}$  – coeficiente de pressão interna (ou na face inferior da cobertura);

$c_p$  – coeficiente de pressão total ou simplesmente coeficiente de pressão;

$\Delta p_e$  – pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face superior (ou externa) da cobertura;

$\Delta p_i$  – pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face inferior (ou interna) da cobertura;

$q$  – pressão dinâmica de referência.

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{fórmula 4})$$

onde:

$V$  – velocidade de referência do vento;

$\rho$  – massa específica do ar.

Os valores positivos dos coeficientes de pressão interna e externa correspondem a sobrepressões e os valores negativos a sucções. Valores positivos para  $c_p$  indicam uma

pressão efetiva com o sentido de uma sobrepressão externa e valores negativos indicam uma pressão efetiva com o sentido de uma sucção externa.

- Coeficientes de forma:

Os coeficientes de forma são calculados conforme as equações 5,6 e 7.

$$C_e = \frac{F_e}{qA} \quad (\text{equação 5})$$

$$C_i = \frac{F_i}{qA} \quad (\text{equação 6})$$

$$C = C_e - C_i \quad (\text{equação 7})$$

onde:

$q$  – pressão dinâmica

$C_e$  – coeficiente de forma externo (ou na face superior da cobertura);

$C_i$  – coeficiente de forma interno (ou na face inferior da cobertura);

$C$  ou  $C_p$  – coeficiente de forma total ou simplesmente coeficiente de forma;

$F_e$  – força na superfície plana externa;

$F_i$  – força na superfície plana interna;

$A$  – área da superfície plana sobre a qual atuam, perpendicularmente, as forças  $F_e$  e  $F_i$ .

Os valores positivos dos coeficientes de forma interno e externo correspondem a sobrepressões e os valores negativos a sucções, aplicados sobre as respectivas faces. Um coeficiente de forma positivo terá o mesmo sentido de uma sobrepressão externa e um coeficiente de forma negativo terá o mesmo sentido de uma sucção externa.

- Coeficiente de força:

$$C_f = \frac{F}{qA} \quad (\text{equação 8})$$

onde:

$F$  – força devida ao vento que atua em uma parte plana da cobertura;

$A$  – área de cada água da cobertura.

O coeficiente de força coincide com o coeficiente de forma total, para o caso de superfícies planas. Não há uma convenção uniforme para definir o sentido positivo de  $C_f$ .

- Coeficiente de sustentação:

O coeficiente de sustentação é calculado conforme a equação 9.

$$C_s = \frac{F_s}{qA} \quad (\text{equação 9})$$

onde:

$F_s$  – força de sustentação: componente vertical da força resultante devida a ação do vento. A convenção mais utilizada é positiva quando dirigida para cima;

$A$  – área em planta da cobertura.

- Coeficiente de arrasto:

$$C_a = \frac{F_a}{qA_e} \quad (\text{equação 10})$$

onde:

$F_a$  – força de arrasto: componente na direção do vento da força resultante devida a ação do vento;

$A_e$  – área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à ação do vento.

#### 1.4.2 Norma Brasileira, NBR 6123 (1988)

Para as coberturas isoladas a uma ou duas águas planas em que a altura livre entre o piso e o nível da aresta horizontal mais baixa da cobertura satisfaça as condições descritas a seguir, e para vento incidindo perpendicularmente à geratriz da cobertura, aplicam-se os coeficientes indicados nas tabelas 1 e 2. Estas tabelas fornecem os valores e os sentidos dos coeficientes de pressão, os quais englobam as ações que exercem perpendicularmente às duas faces da cobertura. Nos casos em que são indicados dois carregamentos, as duas situações respectivas de força devem ser consideradas independentemente.

Os coeficientes das tabelas 1 e 2 aplicam-se somente quando forem satisfeitas as seguintes condições:

Coberturas a uma água (tabela 1):  $0 \leq \text{tg} \theta \leq 0,7$ ;  $h \geq 0,5l_2$

Coberturas a duas águas (tabela 2):  $0,07 \leq \text{tg} \theta \leq 0,6$ ;  $h \geq 0,5l_2$

onde:

$h$  – altura livre entre o piso e o nível da aresta horizontal mais baixa da cobertura;

$l_2$  – profundidade da cobertura;

$\theta$  – ângulo de inclinação da cobertura.

Tabela 1: coeficientes de pressão em coberturas isoladas a uma água plana

Vento	1° Carregamento	2° Carregamento	
	$0 \leq \text{tg}\theta \leq 0,7$	$0 \leq \text{tg}\theta \leq 0,2$	$0,2 \leq \text{tg}\theta \leq 0,3$
→			
←			

(fonte: NBR 6123, 1988)

Tabela 2: coeficientes de pressão em coberturas isoladas a duas águas planas

Coeficientes	1° Carregamento		2° Carregamento	
	$0,07 \leq \text{tg}\theta \leq 0,4$	$0,4 \leq \text{tg}\theta \leq 0,6$	$0,07 \leq \text{tg}\theta \leq 0,4$	$0,4 \leq \text{tg}\theta \leq 0,6$
$C_{pb}$	$2,4\text{tg}\theta + 0,6$	$2,4\text{tg}\theta + 0,6 \leq 0,2$	$0,6\text{tg}\theta - 0,74$	$6,5\text{tg}\theta - 3,1$
$C_{ps}$	$3,0\text{tg}\theta - 0,5$	$+0,7$	$-1,0$	$5,0\text{tg}\theta - 3,0$
Sentidos positivos dos coeficientes de pressão				

(fonte: NBR 6123, 1988)

Para os casos em que a altura seja inferior ao limite fixado, ou em que obstruções possam ser colocadas sob ou junto à cobertura, esta deve resistir a ação do vento, na zona de obstrução, calculada para uma edificação fechada de mesma cobertura, com  $c_{pi} = +0,8$ , para obstruções na borda de sotavento, e com  $c_{pi} = -0,3$ , para obstruções na borda de barlavento.

Para vento paralelo à geratriz da cobertura devem ser consideradas forças horizontais de atrito calculadas pela equação 11:

$$F_{at} = 0,05qab \quad (\text{equação 11})$$

onde  $a$  e  $b$  são as dimensões em planta da cobertura. Estas forças englobam a ação do vento sobre as duas faces da cobertura.

Forças horizontais devidas à ação do vento sobre placas colocadas acima ou abaixo da cobertura são calculadas de acordo com o item 8.1 (muros e placas retangulares) da referida norma, sendo a face da cobertura mais próxima da placa considerada como terreno.

No caso de reticulados diretamente expostos ao vento devem ser adotadas as indicações contidas no item 7.5 (reticulados planos isolados) e 7.6 (reticulados planos múltiplos) da norma em questão.

Em abas (planas ou aproximadamente planas) por ventura existentes ao longo das bordas da cobertura deve ser considerada uma expressão uniformemente distribuída, com força resultante calculada pelas equações 12 e 13:

$$F = 1,3qA_e, \quad \text{para a aba de barlavento} \quad (\text{equação 12})$$

$$F = 0,8qA_e, \quad \text{para a aba de sotavento} \quad (\text{equação 13})$$

onde  $A_e$  é a área frontal efetiva das placas e elementos afins que constituem a aba em estudo. As expressões acima são válidas para abas que formem em relação a vertical um ângulo de no máximo  $30^\circ$ . As forças assim calculadas englobam as pressões que agem em ambas as faces das abas perpendiculares à direção do vento.

Nas abas paralelas à direção do vento devem ser consideradas forças horizontais de atrito calculadas pela equação 14:

$$F_{at} = 0,05qA_e \quad (\text{equação 14})$$

aplicadas a meia altura das abas. Estas forças englobam a ação do vento sobre as duas faces das abas.

Cada elemento de vedação deve ser calculado com  $c_p = \pm 2,0$ .

### 1.4.3 Norma Francesa NV-65 (1980)

Esta norma permite que coberturas isoladas curvas, obedecidas as condições indicadas na figura 5, sejam tratadas como de águas planas. Esta mesma figura indica a altura mínima admitida entre cobertura e solo.

Para coberturas planas a uma água o coeficiente de pressão,  $c_p$ , é obtido pelo produto:

$$c_p = \gamma_\theta c \quad (\text{equação 15})$$

onde  $\gamma_\theta$  é função de  $\gamma$  e este é função de  $\lambda$ , dado pela equação 16:



$$\lambda = \frac{l}{a} \quad (\text{equação 16})$$

onde  $a$  é o comprimento das arestas horizontais.

No caso de  $\lambda \geq 0,20$ m, utiliza-se os seguintes valores em função de  $\theta$ :

$$\theta \leq 52^\circ, \quad \gamma_\theta = 1$$

$$25^\circ < \theta < 35^\circ, \quad \gamma_\theta = \frac{\theta - 25}{10} \gamma + \frac{35 - \theta}{10}$$

$$35^\circ \leq \theta \leq 40^\circ, \quad \gamma_\theta = \gamma$$

$$40^\circ < \theta < 50^\circ, \quad \gamma_\theta = \frac{50 - \theta}{10} \gamma + \frac{\theta - 40}{10}$$

$$\theta \geq 50^\circ, \quad \gamma_\theta = 1$$

No caso de  $\lambda < 0,20$ , utiliza-se:

$$\gamma_\theta = \gamma$$

A tabela 3 apresenta diversos valores do parâmetro  $\gamma$  em função de  $\lambda$ , tirados da escala funcional da NV-65:

Tabela 3: valores de  $\gamma$  em função de  $\lambda$ , tirados da escala funcional da NV-65, para coberturas planas a uma água

$\lambda$ :	5,00	2,50	1,00	0,50	0,20	0,10	0,05	0,03	0,01
$\gamma$ :	1,00	1,22	1,35	1,03	1,00	1,08	1,21	1,30	1,44

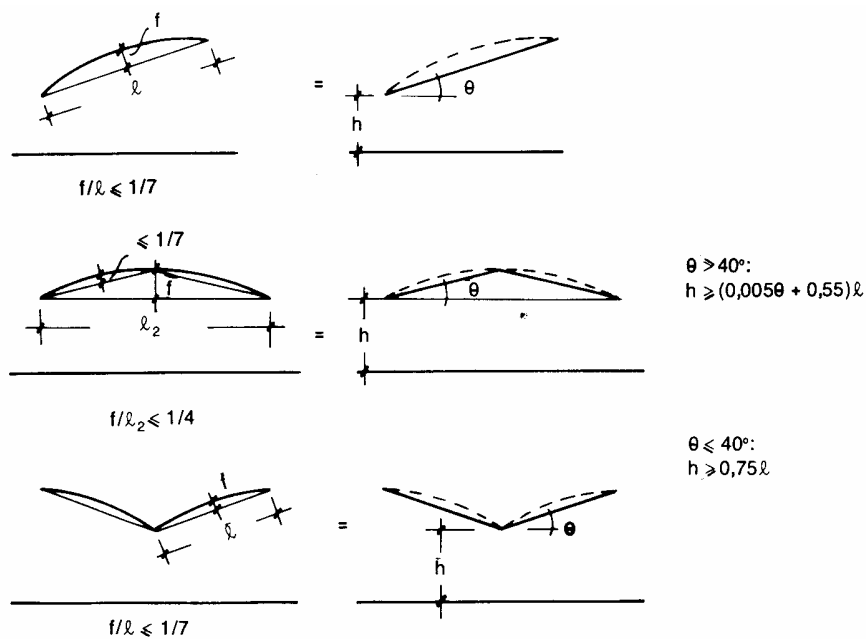


Figura 5: equivalência de coberturas, conforme NV-65

Os valores do coeficiente  $c$  nas duas arestas horizontais da cobertura são retirados do gráfico reproduzido na figura 6. Entre as arestas é admitida uma variação linear.

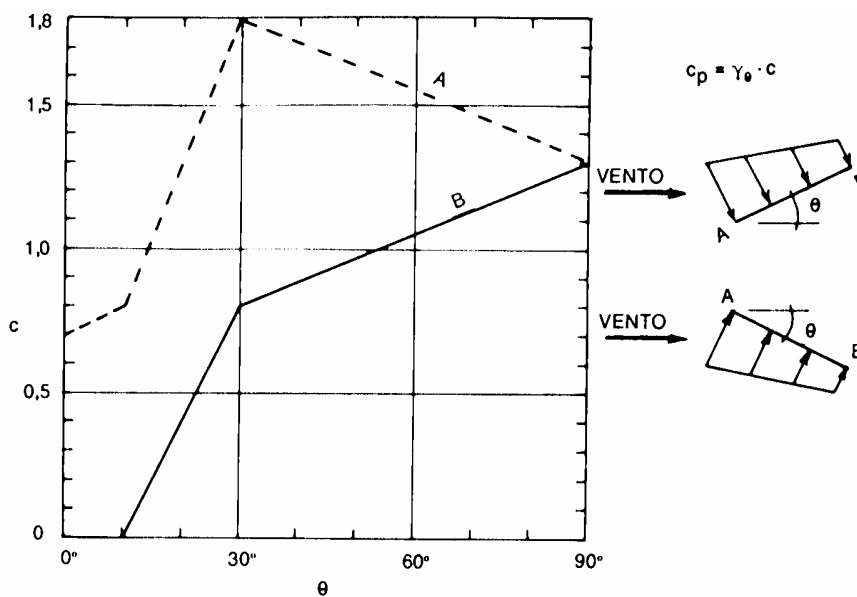


Figura 6: coeficiente  $c$  nas arestas horizontais de coberturas planas a uma água (NV-65)

Para coberturas a duas águas planas, o valor de  $\lambda$  é calculado conforme as equações 17 e 18:

$$\lambda = \frac{l}{a}(1 + \cos 2\theta), \quad \text{para } 0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad (\text{equação 17})$$

$$\lambda = \frac{l}{a}, \quad \text{para } \theta > 50^\circ \quad (\text{equação 18})$$

Sendo:

$$c_p = \gamma \cdot c \quad (\text{equação 19})$$

Valores de  $\gamma$  tirados da escala funcional da norma francesa, em função de  $\lambda$ , para qualquer  $\theta$ , são dados na tabela 4:

Tabela 4: valores de  $\gamma$  em função de  $\lambda$ , tirados da escala funcional da NV-65, para coberturas planas a duas águas

$\lambda$ :	0,20	0,10	0,05	0,03	0,01
$\gamma$ :	1,00	1,08	1,21	1,30	1,44

A figura 7 permite determinar os valores de  $c$  nas três arestas horizontais da cobertura. Entre elas é admitida uma variação linear.

São consideradas as seguintes direções do vento para a determinação das ações resultantes máximas e para as ações de conjunto máximas:

- uma direção perpendicular à borda horizontal, que fornece a ação resultante sobre a cobertura e uma das ações do conjunto;

- uma direção oblíqua à borda horizontal, que fornece para as extremidades da cobertura uma ação resultante e uma ação de conjunto. Estas ações podem ser mais desfavoráveis que as devidas a um vento perpendicular a borda horizontal (só para cobertura a duas águas);
- uma direção paralela à borda horizontal, que fornece a segunda ação do conjunto (forças de atrito).

Para o vento oblíquo à borda horizontal a norma francesa manda adicionar aos valores do primeiro caso (vento perpendicular à borda horizontal) uma sobrepressão uniforme sobre a face inferior do diedro (trata-se aqui, portanto, do caso de coberturas a duas águas) com  $c_p = +0,5$ , seja em uma extremidade seja na outra, em uma distância na direção longitudinal igual à aresta  $l$  da cobertura.

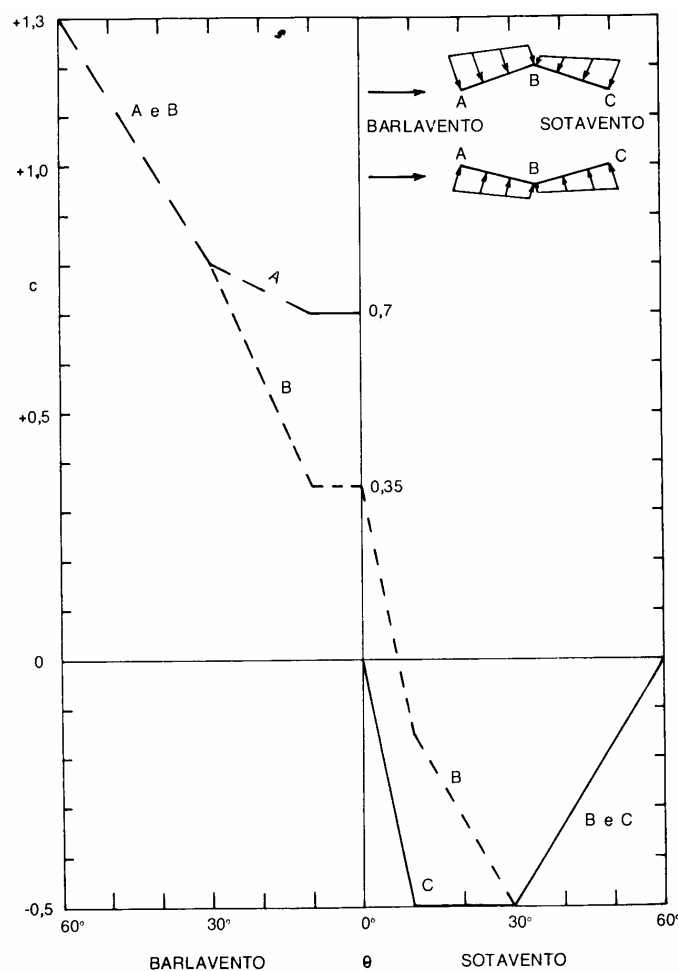


Figura 7: coeficiente  $c$  nas arestas horizontais de coberturas planas a duas águas (NV-65)

Para vento paralelo à borda horizontal a ação de um conjunto é considerada como uma força horizontal de “atrito” (será na realidade um arrasto no caso de coberturas com ondas, dobras ou nervuras), soma de duas forças aplicadas a ambas as faces. O valor por face de cada uma destas forças unitárias é tomado igual a:

0,010 $q$  para as faces planas e para as faces com ondas (curvas ou poligonais – “dobras”) paralelas à direção do vento;

0,020 $q$  para as faces com ondas perpendiculares à direção do vento;

0,040 $q$  para as faces com nervuras perpendiculares à ação do vento;

sendo  $q$  a pressão dinâmica no nível superior da cobertura.

Se necessário, verificar para o caso da cobertura se encontrar provisoriamente em condições aerodinâmicas diferentes das especificadas acima.

A distância mínima entre a cobertura e o solo, para a aplicação das indicações da norma francesa, está indicada na figura 5.

#### 1.4.4 Norma da Convenção Européia de Construções Metálicas, CECM (1979)

A norma da Convenção Européia de Construções Metálicas, CECM, não indica coeficientes de pressão, mas, diretamente coeficientes de força aplicáveis a cada água da cobertura, bem como a posição do ponto de aplicação da força correspondente. Estes elementos são obtidos graficamente, como pode ser visto na figura 8. Se  $h/l$  for menor que 0,75 ou se obstáculos puderem ser colocados sob a cobertura, esta deve igualmente poder resistir às ações mais desfavoráveis do caso de construções apresentando um volume inferior (construções “fechadas”), abertas em uma ou várias paredes.

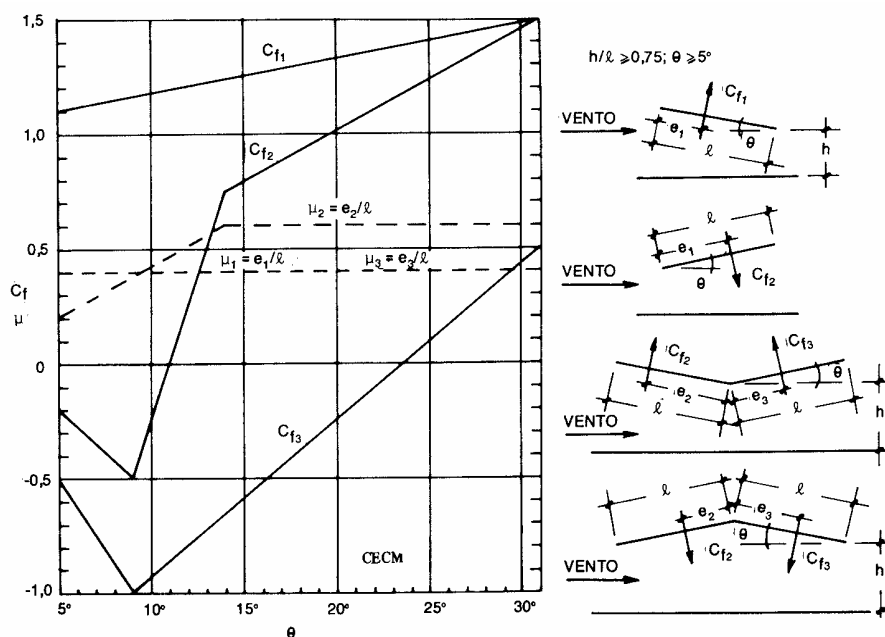


Figura 8: coeficientes de força e ponto de aplicação (CECM/1979)

#### 1.4.5 Norma da Suécia (1975)

A norma da Suécia é muito semelhante à da CECM. As diferenças consistem basicamente nos seguintes aspectos:

- supõe uma distribuição uniforme de pressões, com os mesmos sentidos dos coeficientes de força da CECM;
- o ponto de aplicação fica situado no centro de cada água da cobertura;
- as abscissas são dadas em função da tangente da inclinação  $\theta$  (figura 8). As curvas do gráfico referem-se a  $c_p$ , neste caso numericamente igual a  $c_f$ .

O ângulo de inclinação da cobertura  $\theta$  deve estar situado entre 5° e 31°.

## 2 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

### 2.1 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos deste trabalho adotou-se a seguinte metodologia:

- Foram construídos 4 modelos da cobertura estudada por Robertson, Hoxey e Moran (1985), descritos a seguir.
- Cada um dos 4 modelos foi ensaiado em escoamentos uniforme e suave, uniforme e turbulento e deslizante e turbulento.
- Finalmente, os resultados dos ensaios, as medições *in situ* realizadas por Robertson, Hoxey e Moran (1985) no protótipo da cobertura ensaiada e o modelo da Norma Brasileira NBR 6123 foram comparados de maneira que seja possível avaliar:
  - A influência da escala do modelo nos resultados de ensaios em túnel de vento;
  - O efeito do tipo de escoamento nas ações estáticas exercidas pelo vento em coberturas isoladas a duas águas;
  - A influência da espessura do telhado do modelo nos resultados de ensaios em túnel de vento;
  - A aplicabilidade dos modelos sugeridos pela Norma Brasileira para a determinação da ação estática do vento em coberturas isoladas.

## 2.2 MODELOS

Os modelos ensaiados correspondem a uma cobertura isolada a duas águas, sustentada por doze pilares. Esses modelos correspondem ao protótipo estudado por Robertson, Hoxey e Moran (1985). As dimensões desta cobertura isolada são apresentadas na figura 9.

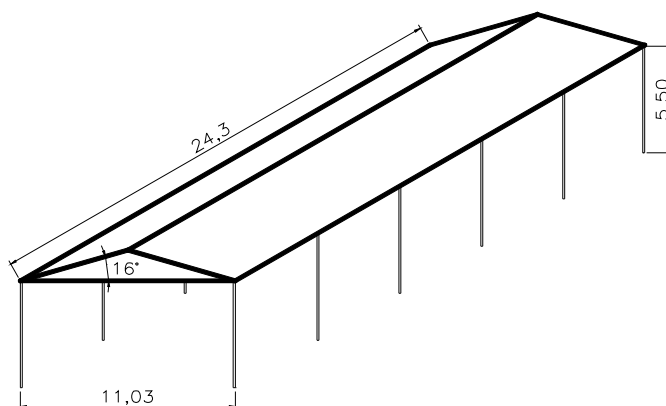


Figura 9: protótipo estudado por Robertson, Hoxey e Moran (1985), dimensões em metros

Foram construídos quatro modelos em alumínio, cujas características estão descritas a seguir:

Modelo 1: escala 1:75, diâmetro dos pilares  $\phi = 2,3mm$ , espessura do telhado  $e = 2,0mm$

Modelo 2: escala 1:100, diâmetro dos pilares  $\phi = 2,3mm$ , espessura do telhado  $e = 2,0mm$

Modelo 3: escala 1:300, diâmetro dos pilares  $\phi = 2,3mm$ , espessura do telhado  $e = 2,0mm$

Modelo 4: escala 1:300, diâmetro dos pilares  $\phi = 2,3mm$ , espessura do telhado  $e = 0,5mm$



A tabela 5 apresenta as características relevantes dos modelos.

Tabela 5: características dos modelos

Modelo	1	2	3	4
Escala	1:75	1:100	1:300	1:300
Largura [mm]	146,7	110,0	36,7	36,7
Comprimento [mm]	324,0	243,0	81,0	81,0
Altura dos pilares [mm]	77,3	55,0	18,3	18,3
Inclinação do telhado [°]	16	16	16	16
Diâmetro dos pilares [mm]	2,3	2,3	2,3	2,3

As figuras 10 a 13 apresentam fotografias dos modelos.

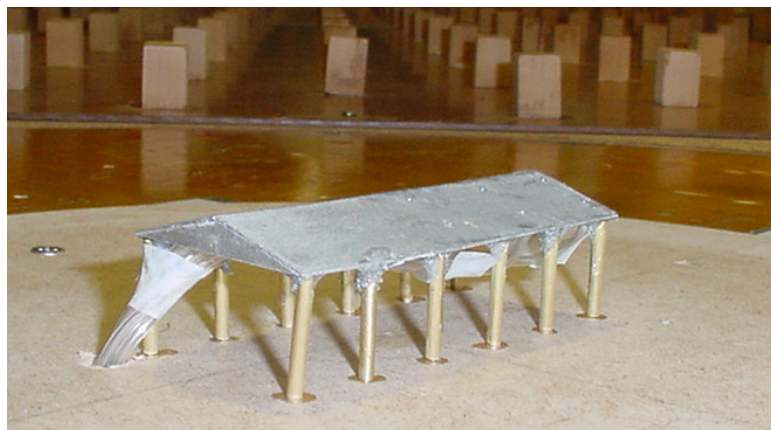


Figura 10: modelo 4 com tomadas de pressão externa



Figura 11: modelo 3 com tomadas de pressão externa



Figura 12: modelo 2 com tomadas de pressão externa e simuladores de rugosidade do terreno



Figura 13: modelo 1 com tomadas de pressão externa

Para comparar as distorções de escala dos resultados, foram definidos dois parâmetros: o diâmetro relativo,  $\varphi_D$ , e a espessura relativa  $\varphi_{Th}$ . O menor modelo foi construído com duas espessuras diferentes de telhado, para identificar a influência da espessura relativa  $\varphi_{Th}$ .

$$\varphi_D = \frac{D}{A} \quad (\text{equação 20})$$

$$\varphi_{Th} = \frac{E}{B} \quad (\text{equação 21})$$

onde:

$D$  – diâmetro do pilar [cm]

$A$  – distância entre dois pilares adjacentes [cm]

$E$  – espessura do telhado [cm]

$B$  – altura do pilar [cm]

Na tabela 6 são apresentados os diâmetros relativos e as espessuras relativas dos modelos ensaiados. Os menores valores de  $\varphi_D$  e de  $\varphi_{Th}$  correspondem a menores distorções de escala, isto é, representam melhor o protótipo.

Tabela 6: diâmetros relativos  $\varphi_D$  e espessuras relativas  $\varphi_{Th}$  dos modelos

modelo	1	2	3	4
escala	1:75	1:100	1:300	1:300
$\varphi_D$	0,04	0,05	0,14	0,14
$\varphi_{Th}$	0,03	0,04	0,11	0,03

Os modelos foram instrumentados com tomadas de pressão: os modelos 1 e 2 com dezesseis tomadas de pressão e os modelos 3 e 4 com seis, conforme mostram as figuras 14, 15 e 16.

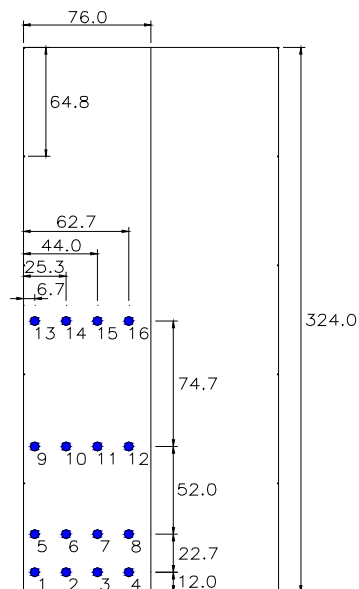


Figura 14: dimensões [mm] do modelo 1 e localização das tomadas de pressão interna e externa

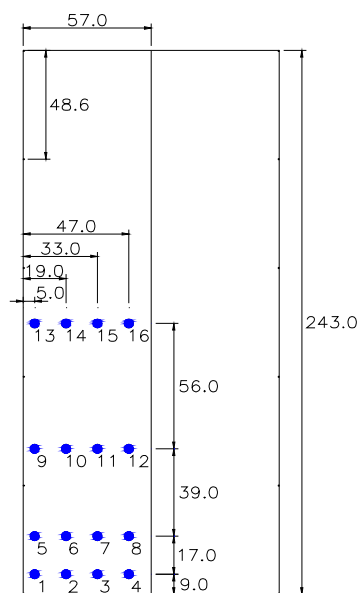


Figura 15: dimensões [mm] do modelo 2 e localização das tomadas de pressão interna e externa

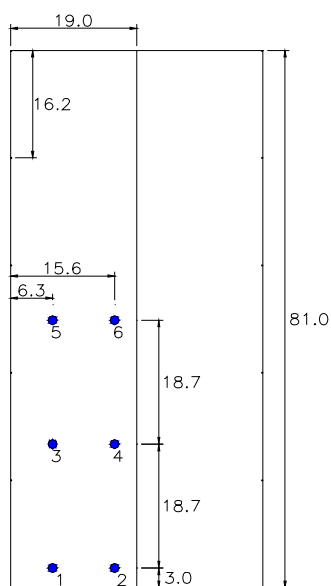


Figura 16: dimensões [mm] dos modelos 3 e 4 e localização das tomadas de pressão interna e externa

## 2.3 TÚNEL DE VENTO

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982), mostrado na figura 17. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação *comprimento / altura* da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, é de 42 m/s. As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP e a velocidade do escoamento é controlada manualmente através de aletas radiais metálicas que obstruem a passagem do ar.



Figura 17: túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann

Atualmente o túnel de vento dispõe de três mesas giratórias para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos. A localização destas mesas e outras características físicas do túnel de vento podem ser vistas na figura 18. Maiores detalhes e outras informações sobre o túnel de vento podem ser encontrados em Blessmann (1982, 1990a).

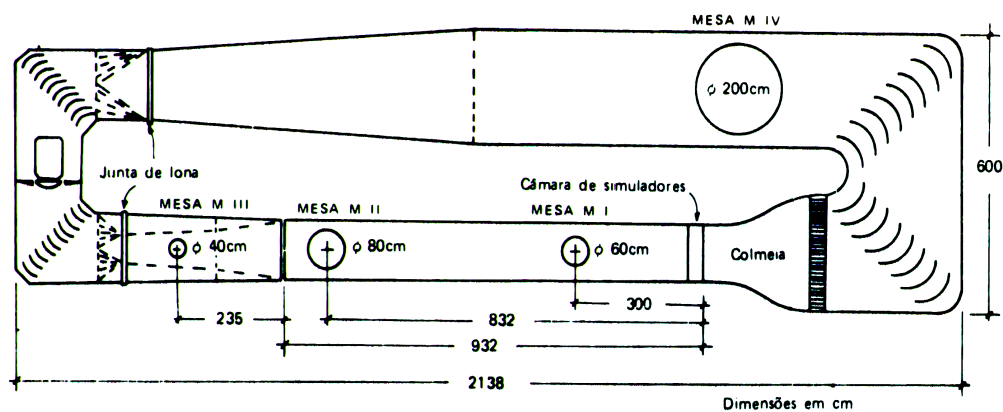


Figura 18: circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (Blessmann, 1990a)

Durante a realização dos testes a velocidade do túnel foi monitorada através da medida diferencial de pressão estática,  $\Delta p_a$ , lida em dois anéis piezométricos situados nos extremos do convergente posicionado na entrada da seção principal de trabalho. Estas leituras foram feitas por meio de um micromanômetro a água tipo Betz, e podem ser acompanhadas de medidas feitas pelos multimanômetros a álcool. Para os diversos perfis de velocidade dos ventos simulados no túnel foram determinados os coeficientes  $k_o$ , que vinculam a pressão dinâmica,  $q$ , no eixo do túnel e a pressão de referência  $\Delta p_a$ . Desta forma é possível calcular a pressão dinâmica e a velocidade do escoamento em qualquer ponto da seção transversal, devidamente mapeada, pela simples leitura da pressão de referência. A velocidade é obtida por:

$$V = \sqrt{\frac{2q}{\rho}} \quad (\text{equação 22})$$

onde:

$q$  – pressão dinâmica de referência [Pa]

$\rho$  – massa específica do ar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V$  – velocidade média do vento [m/s]

A relação de bloqueio é calculada pela razão entre a área frontal efetiva do modelo (direção do vento de  $90^\circ$ ) e a área da seção transversal do túnel, dada pela equação 23:

$$r = \frac{A_e}{A_{\text{túnel}}} \quad (\text{equação 23})$$

onde:

$r$  – relação de bloqueio

$A_e$  – área frontal efetiva [ $\text{mm}^2$ ]

$A_{túnel}$  – área da seção transversal do túnel de vento [ $\text{mm}^2$ ]

A tabela 7 apresenta os valores da relação de bloqueio para cada modelo ensaiado.

Tabela 7: área frontal efetiva do modelo (direção do vento de  $90^\circ$ ) e relação de bloqueio

Modelo	1	2	3	4
Escala	1:75	1:100	1:300	1:300
$A_e$ [ $\text{mm}^2$ ]	7881,36	4591,35	678,74	678,74
$A_{túnel}$ [ $\text{mm}^2$ ]	1161000,00	1161000,00	1161000,00	1161000,00
r [%]	0,68	0,40	0,06	0,06

## 2.4 ESCOAMENTOS

Os modelos foram estudados sob quatro simulações de vento. Na mesa M-I os modelos foram ensaiados com o vento uniforme e suave e uniforme e turbulento. Na mesa M-II foram simulados os ventos deslizantes e turbulentos com perfis potenciais de velocidades médias de expoente  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ .

O perfil das velocidades médias é expresso, aproximadamente, pela lei potencial:

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{equação 24})$$

onde:

$V(z)$  – velocidade média na altura  $z$

$V_{ref}$  – velocidade média em uma altura de referência

$z_{ref} = 450\text{mm}$  – cota do eixo longitudinal do túnel de vento

$p$  – expoente da curva de potência



As principais características dos ventos simulados podem ser vistas nas figuras 19, 20 e 21: perfil vertical das velocidades médias, intensidade ( $I_1$ ) e macroescala ( $L_1$ ) da componente longitudinal da turbulência. O perfil vertical das velocidades médias é apresentado em porcentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica).

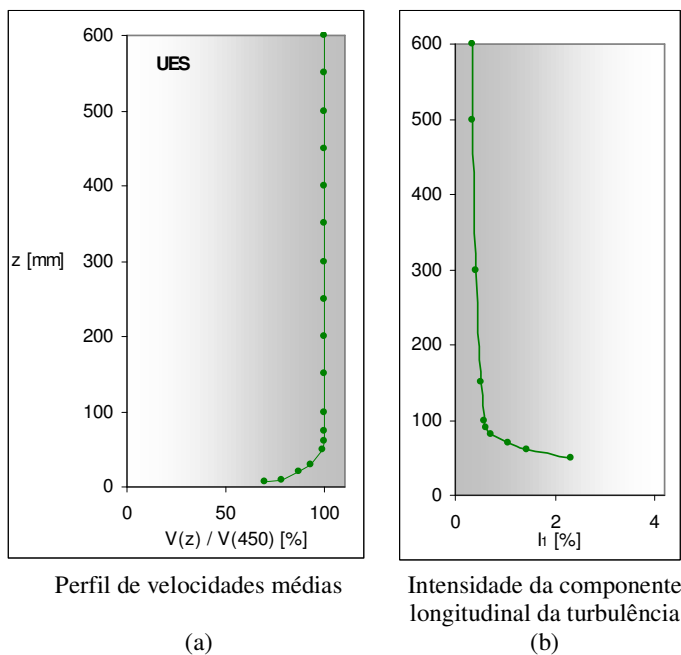


Figura 19: características do vento uniforme e suave: (a) perfil de velocidades médias e (b) intensidade da componente longitudinal da turbulência

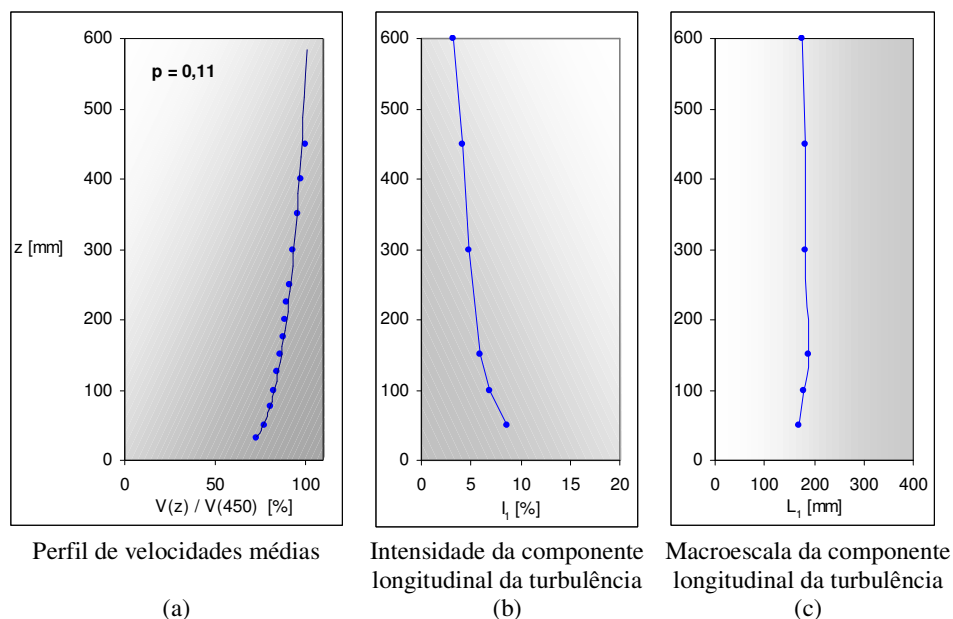


Figura 20: características do vento deslizando e turbulento com expoente  $p = 0,11$ : (a) perfil de velocidades médias, (b) intensidade da componente longitudinal da turbulência e (c) macroescala da componente longitudinal da turbulência

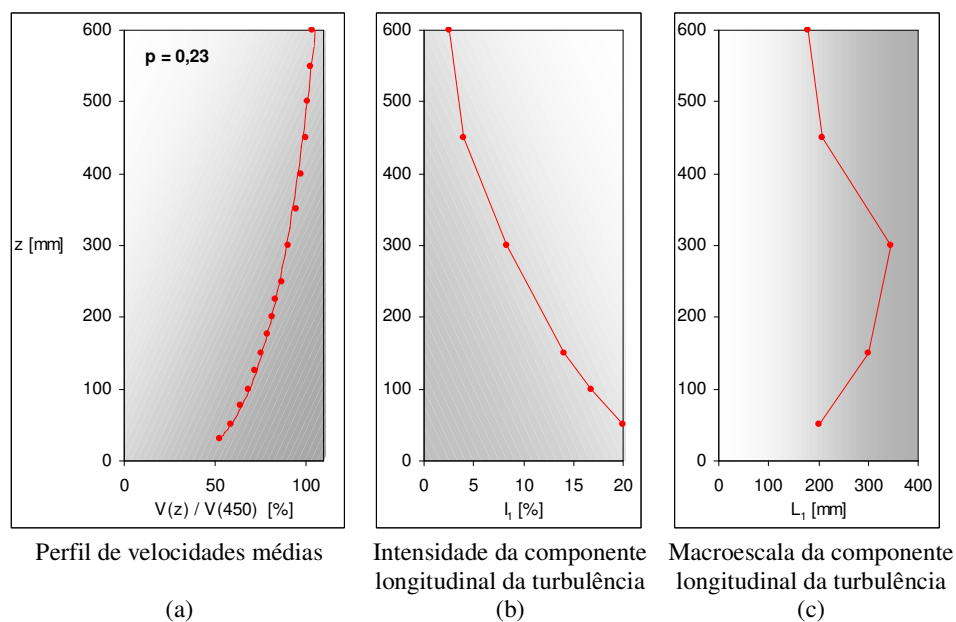


Figura 21: características do vento deslizando e turbulento com expoente  $p = 0,23$ : (a) perfil de velocidades médias, (b) intensidade da componente longitudinal da turbulência e (c) macroescala da componente longitudinal da turbulência

Os valores de intensidade ( $I_1$ ) e macroescala ( $L_1$ ) da componente longitudinal da turbulência para os ensaios dos modelos 1, 2, 3 e 4 estão apresentados na tabela 6.

Tabela 8: intensidade ( $I_1$ ) e macroescala ( $L_1$ ) da componente longitudinal da turbulência para os ensaios dos modelos 1, 2, 3 e 4

	Escoamento Uniforme e suave	Escoamento Deslizante e turbulento $p=0,11$		Escoamento Deslizante e turbulento $p=0,23$	
	$I_1$ [%]	$L_1$ [mm]	$I_1$ [%]	$L_1$ [mm]	$I_1$ [%]
Modelo 1	0,6	175	7,0	242	17,0
Modelo 2	1,0	170	7,8	219	19,0
Modelo 3	2,3	165	8,4	200	20,0
Modelo 4	2,3	165	8,4	200	20,0

## 2.5 NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds,  $Re$ , é o parâmetro que estabelece uma relação entre as forças de inércia e as de viscosidade atuantes no escoamento, conforme a equação 25:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (\text{equação 25})$$

onde:

$V$  – velocidade média do vento

$d$  – dimensão característica (vão da cobertura)

$\nu$  – viscosidade cinemática do ar

O número de Reynolds calculado para os ensaios realizados em túnel de vento para os modelos 1, 2, 3 e 4 está apresentado nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9: número de Reynolds calculado para os ensaios de pressão externa realizados em túnel de vento para os modelos 1, 2, 3 e 4

<b>Pressão externa</b>				
	Escoamento Uniforme e suave	Escoamento Uniforme e turbulento	Escoamento Deslizante e turbulento $p=0,11$	Escoamento Deslizante e turbulento $p=0,23$
	Re	Re	Re	Re
Modelo 1	407.777	238.941	275.451	243.790
Modelo 2	303.355	172.172	199.652	172.135
Modelo 3	86.927	51.338	60.959	46.110
Modelo 4	84.587	51.476	61.168	46.587

Tabela 10: número de Reynolds calculado para os ensaios de pressão interna realizados em túnel de vento para os modelos 1, 2, 3 e 4

<b>Pressão interna</b>				
	Escoamento Uniforme e suave	Escoamento Uniforme e turbulento	Escoamento Deslizante e turbulento $p=0,11$	Escoamento Deslizante e turbulento $p=0,23$
	Re	Re	Re	Re
Modelo 1	402.914	222.874	281.803	235.083
Modelo 2	285.221	171.595	205.910	164.819
Modelo 3	85.859	50.192	59.664	44.896
Modelo 4	81.813	49.654	60.083	44.963

## 2.6 ENSAIOS

Os ensaios foram realizados variando-se o ângulo de incidência do vento ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ) e o tipo de escoamento. Como os modelos foram instrumentados somente em um quadrante, foi necessário girar o modelo em  $360^\circ$  para a determinação dos coeficientes aerodinâmicos de toda a cobertura. As leituras foram realizadas a cada  $45^\circ$ , resultando num total de 8 incidências para cada modelo. A figura 22 mostra a referência para o ângulo de incidência do vento.

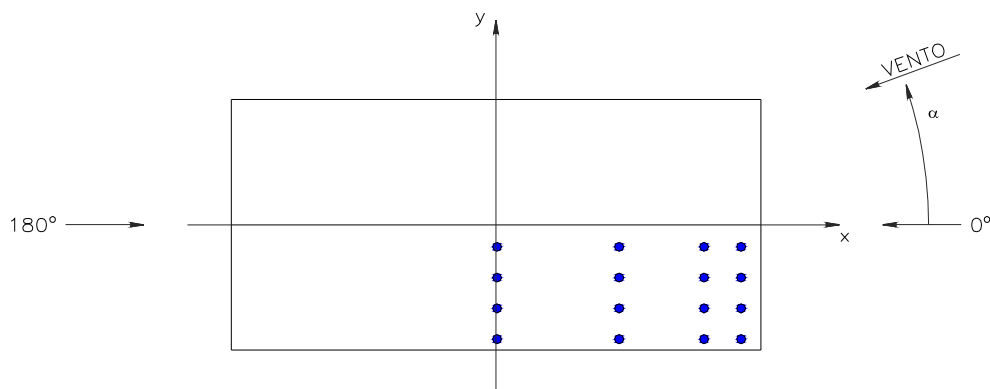


Figura 22: referência para cada ângulo de incidência do vento

As pressões nos modelos são medidas através de um manômetro a álcool, fornecendo os valores médios de pressão em sua superfície. As tomadas de pressão são conectadas ao multimanômetro a álcool através de mangueiras, apresentando a pressão média de cada tomada. O registro das pressões dos manômetros é feito em fotografias do multimanômetro, registrando-se, assim, a posição das colunas de álcool, para a posterior leitura dos dados. Este procedimento é repetido para cada configuração de ensaio, variando o ângulo de incidência e o tipo de escoamento. As figuras 23 e 24 mostram as pressões externas medidas no multimanômetro correspondentes ao ensaio do modelo 1, com escoamento uniforme e suave e uniforme e turbulento, com vento incidindo a  $0^\circ$ .

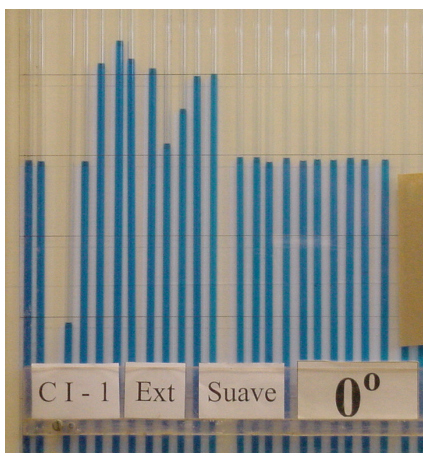


Figura 23: pressões externas medidas para o modelo 1, escoamento uniforme e suave

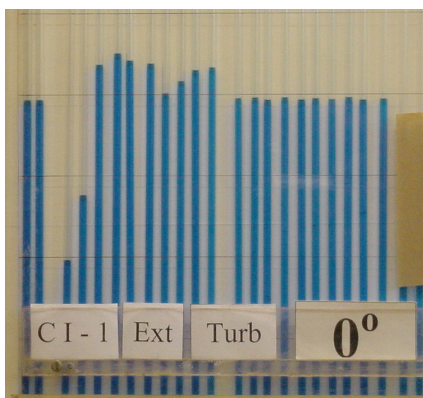


Figura 24: pressões externas medidas para o modelo 1, escoamento uniforme e turbulento

Foram medidas pressões internas (inferiores) e externas (superiores) para cada modelo, variando o ângulo de incidência e o tipo de escoamento, como mencionado anteriormente, resultando num total de 2816 medições de pressão, conforme indica a tabela 11.

Tabela 11: número de medições de pressão para cada modelo

Modelo	Número de medições de pressão
1	1024
2	1024
3	384
4	384
Total	2816

## 2.7 PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Através dos registros do multimanômetro a álcool, determinam-se as diferenças de pressão para cada um dos ângulos de incidência do vento e regimes de escoamento. Os coeficientes de pressão associados às pressões medidas são calculados por:

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} \quad (\text{equação 26})$$

onde:

$\Delta p$  – pressão diferencial na tomada da superfície do modelo

$q$  – pressão dinâmica de referência

Foi adotada a seguinte convenção de sinais:

- coeficientes positivos: sobrepressão (+)
- coeficientes negativos: sucção (-)

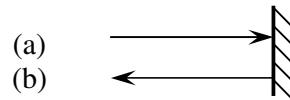


Figura 25: convenção de sinais adotada para os coeficientes de pressão: (a) coeficientes positivos (+) e (b) coeficientes negativos (-)

### 3 RESULTADOS

Nas Figuras 27 a 38 são apresentados alguns dos resultados obtidos neste estudo e dos ensaios *in situ*, realizados por Robertson, Hoxey e Moran (1985). Esses resultados são apresentados na forma de curvas isobáricas. Os números de Reynolds atingidos nos ensaios estão indicados nestas figuras.

No Anexo I são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios, também na forma de curvas isobáricas.

Nos ensaios realizados em escala real, por Robertson, Hoxey e Moran (1985), foram colocadas 16 tomadas de pressão interna (inferior) e 24 tomadas de pressão externa (superior) em toda a cobertura, posicionadas conforme as figuras 25 e 26.

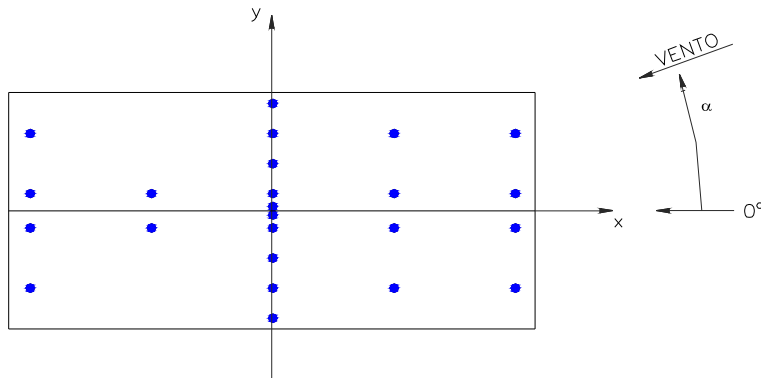


Figura 26: distribuição das tomadas de pressão externa da cobertura em escala real ensaiada por Robertson, Hoxey e Moran (1985)



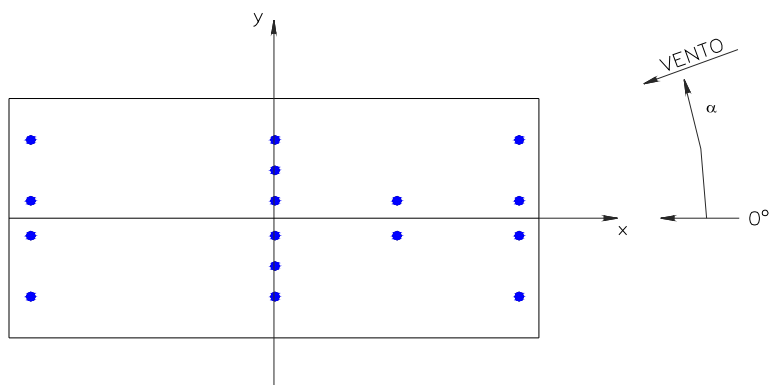


Figura 27: distribuição das tomadas de pressão interna da cobertura em escala real ensaiada por Robertson, Hoxey e Moran (1985)

### 3.1 COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA (SUPERIOR)

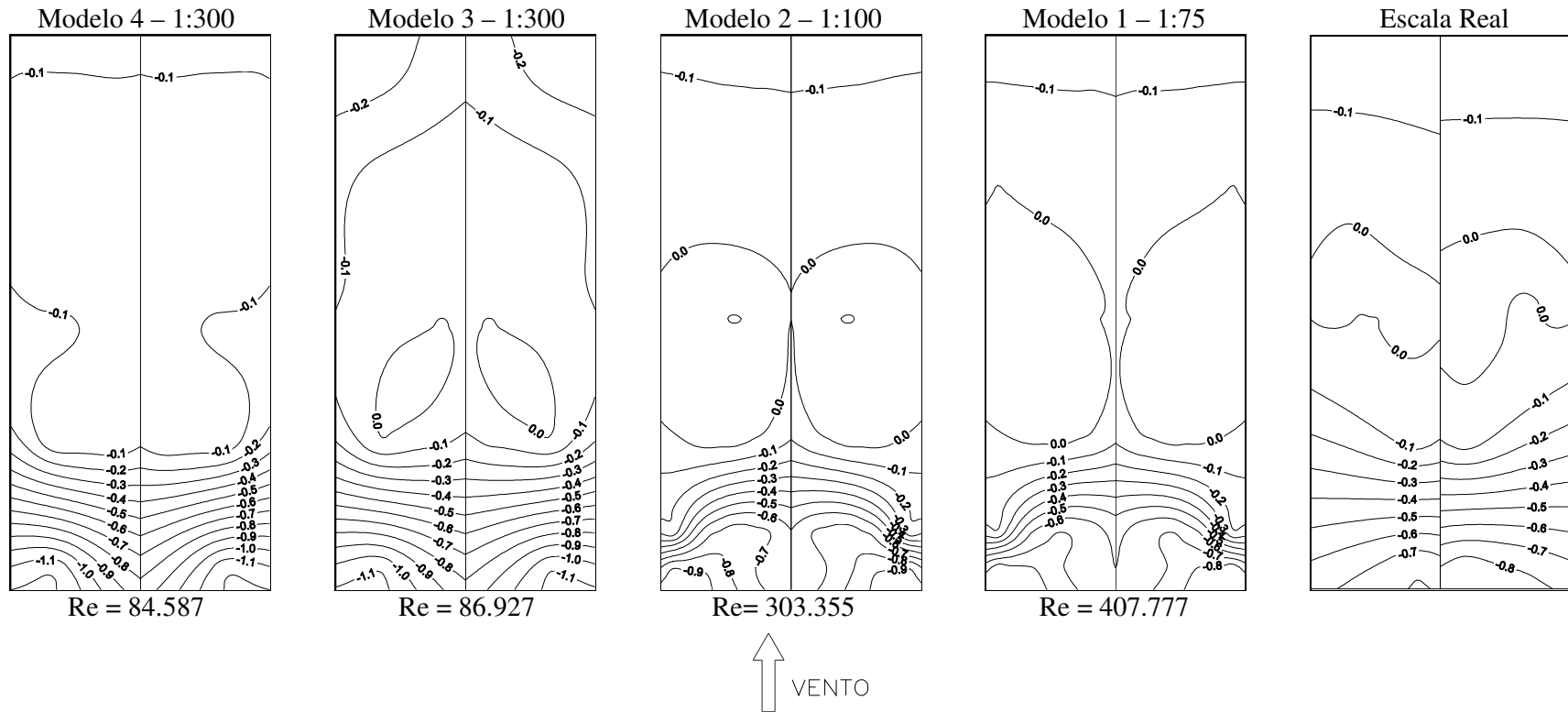


Figura 28: coeficientes de pressão externa para escoamento suave com ângulo de incidência de 0°, modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

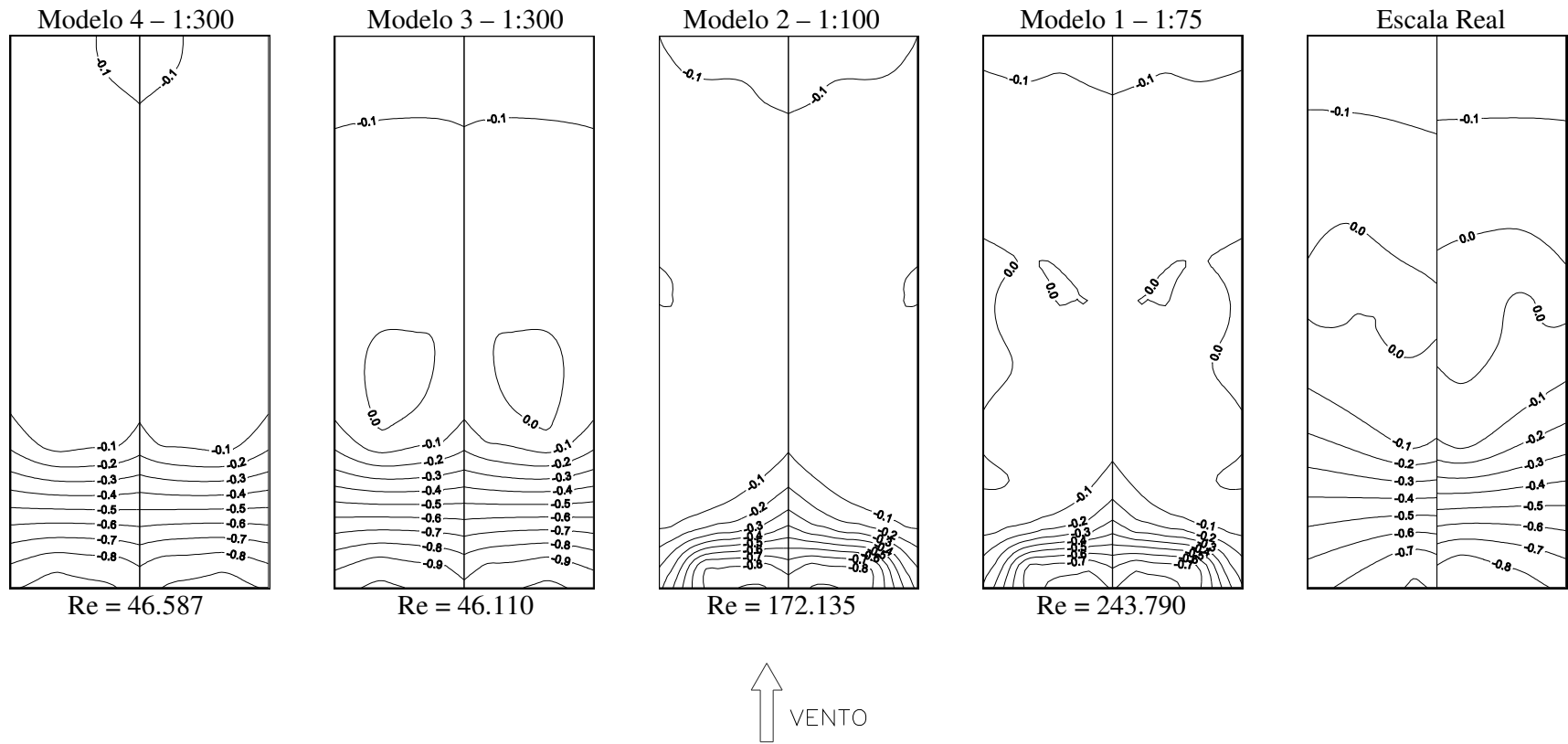


Figura 29: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

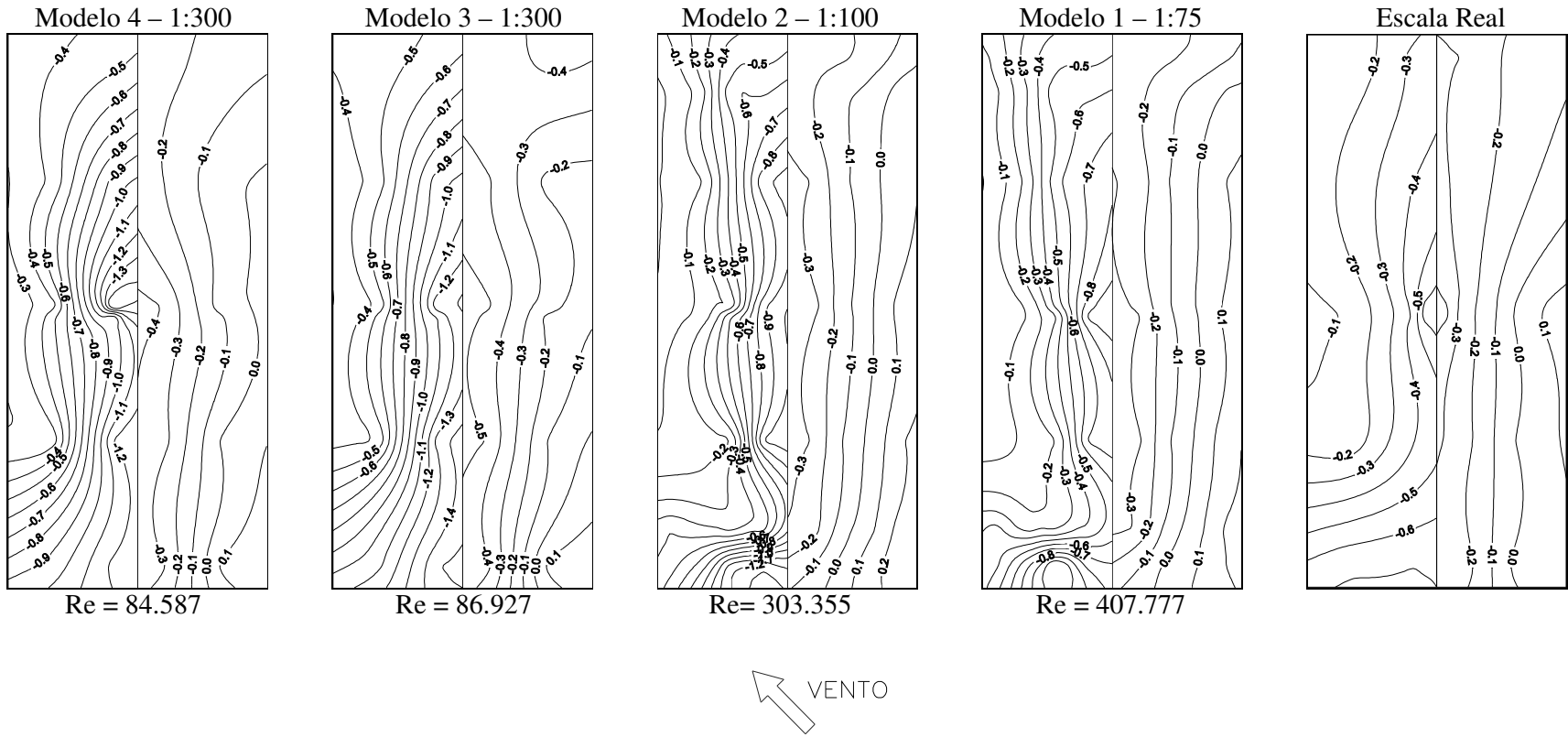


Figura 30: coeficientes de pressão externa para escoamento suave com ângulo de incidência de 45°, modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

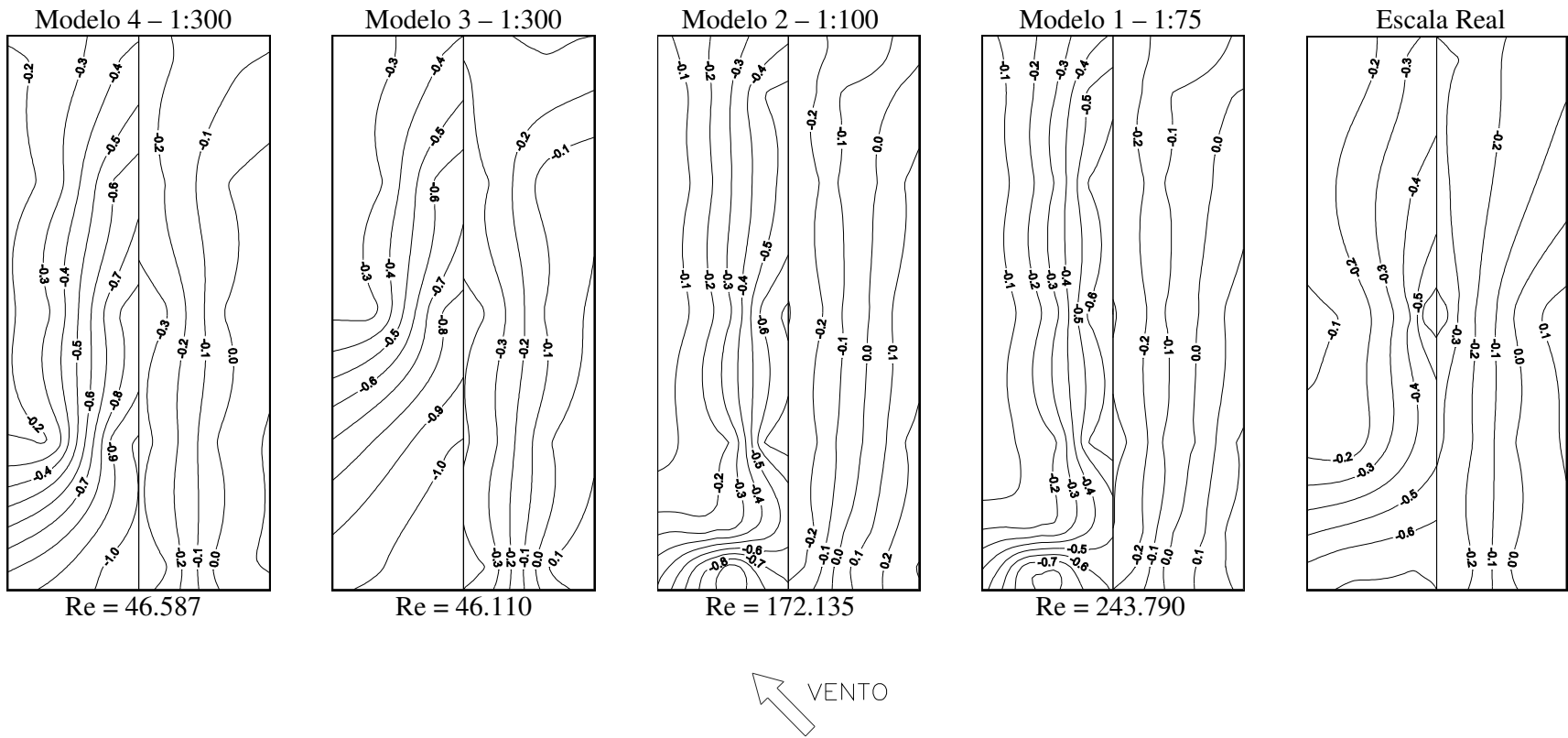


Figura 31: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

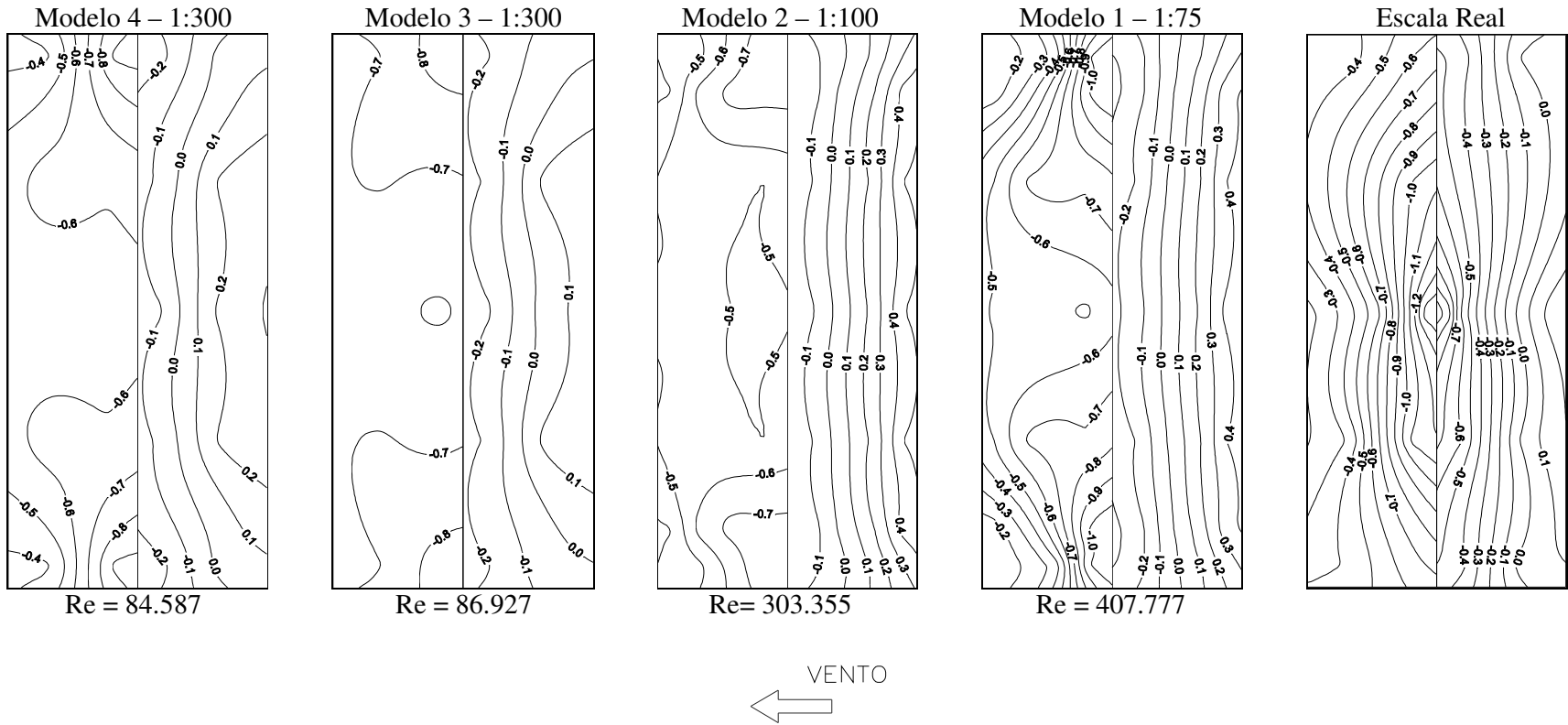


Figura 32: coeficientes de pressão externa para escoamento suave com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

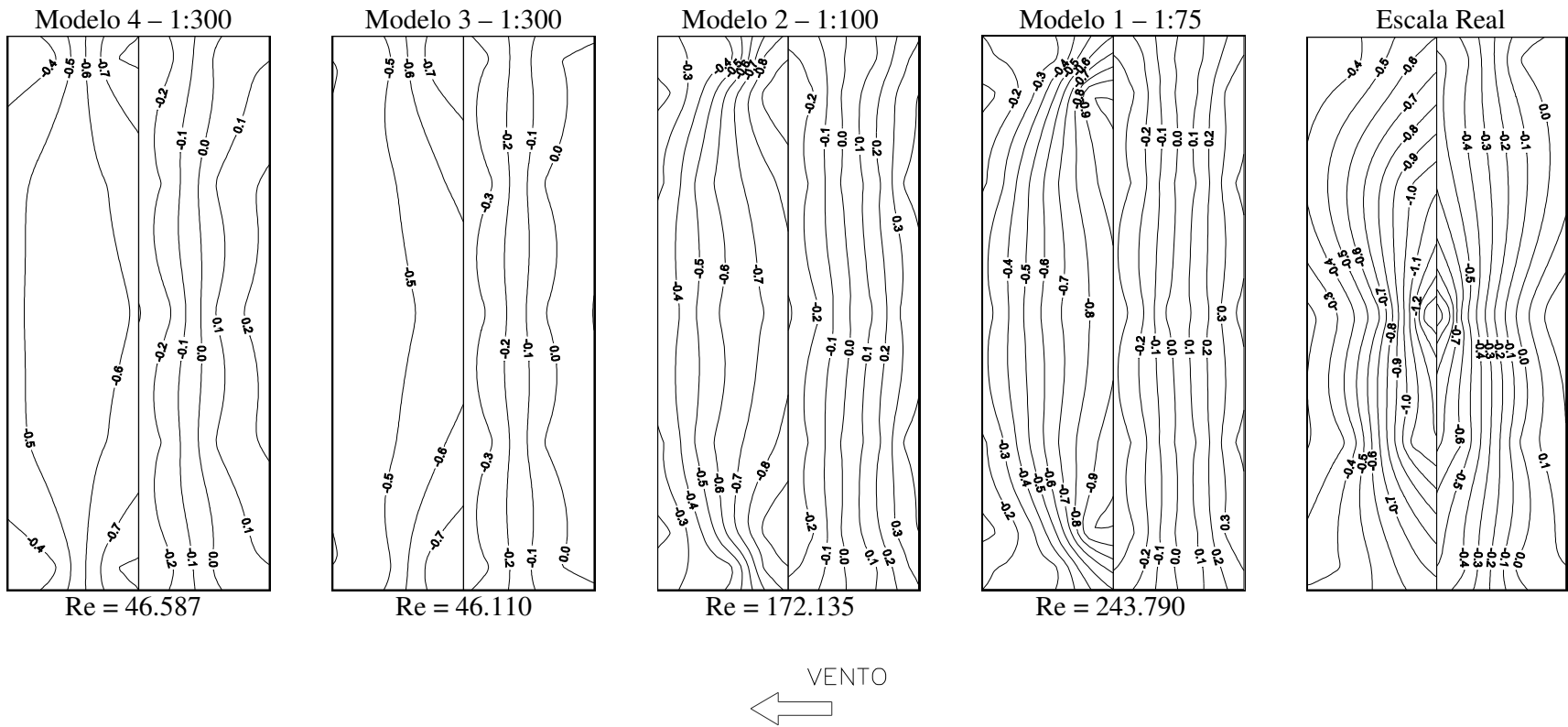


Figura 33: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizante e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

### 3.2 COEFICIENTES DE PRESSÃO INTERNA (INFERIOR)

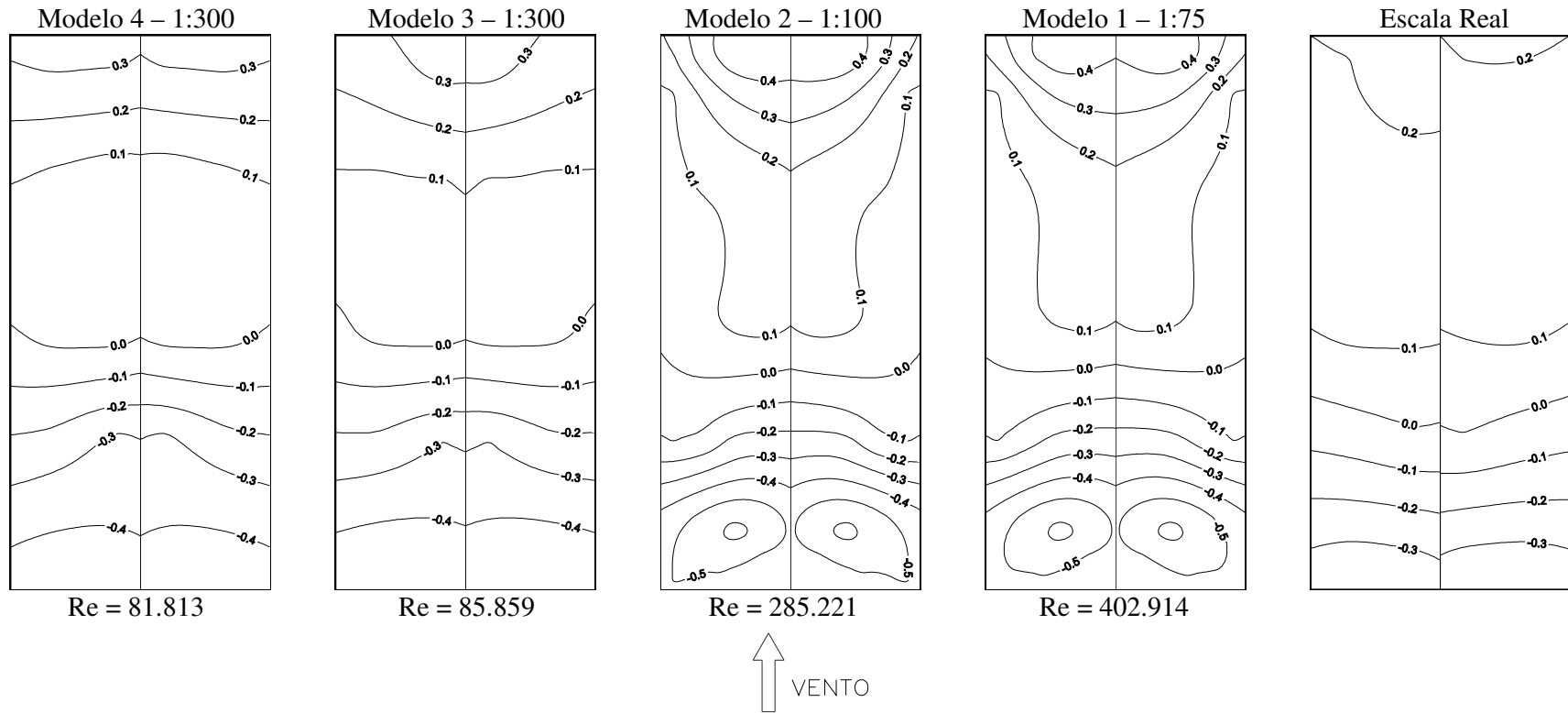


Figura 34: coeficientes de pressão interna para escoamento suave com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real



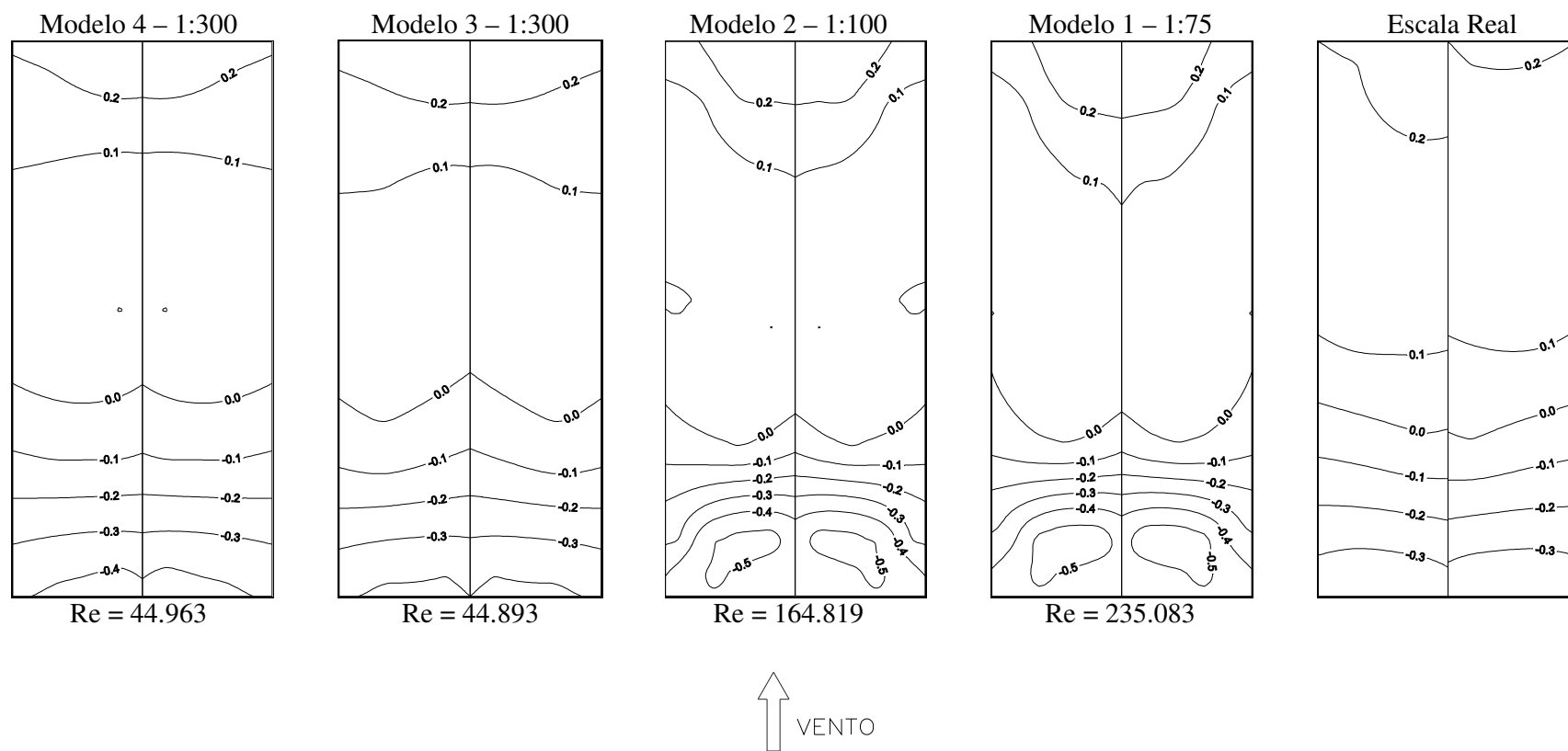


Figura 35: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

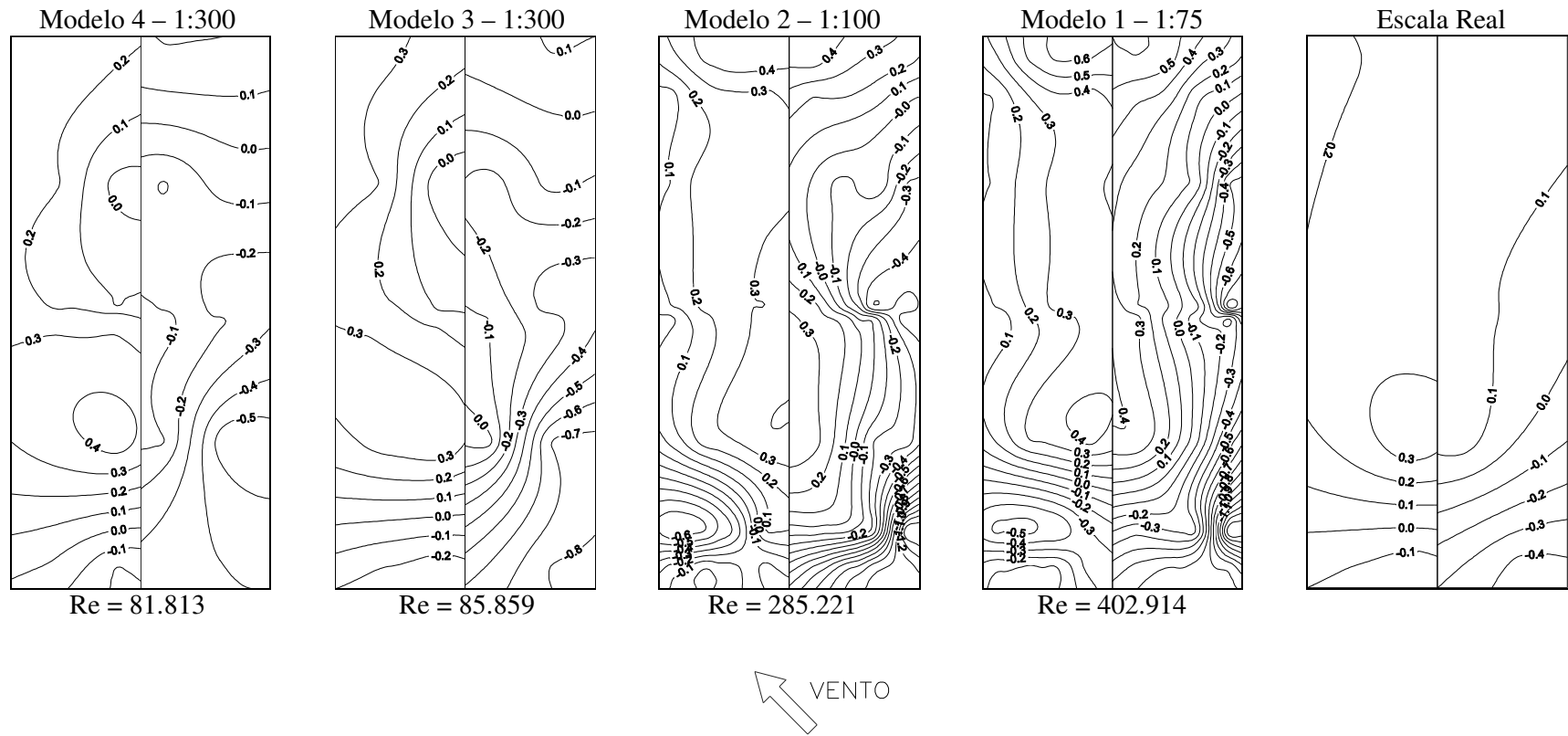


Figura 36: coeficientes de pressão interna para escoamento suave com ângulo de incidência de 45°, modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

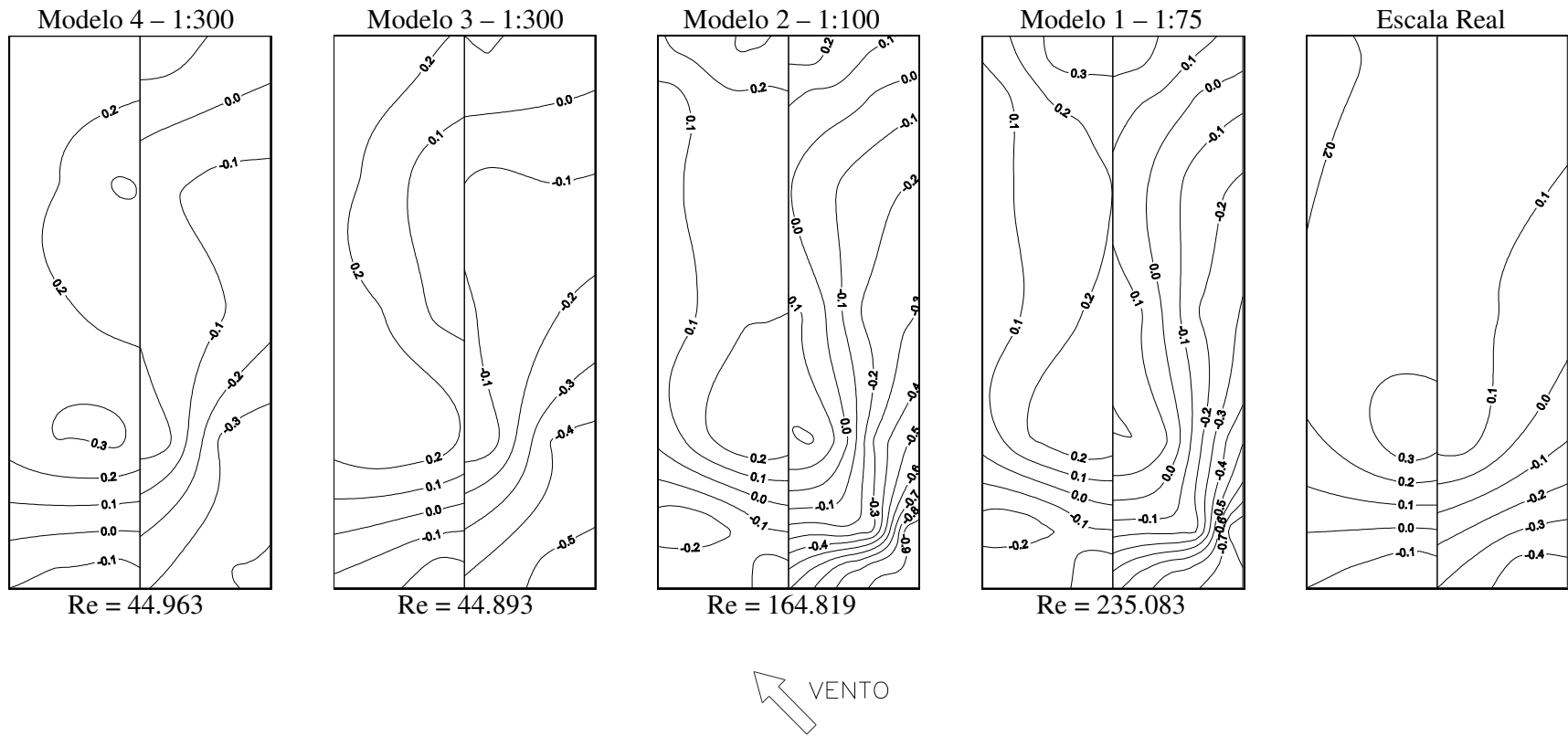


Figura 37: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

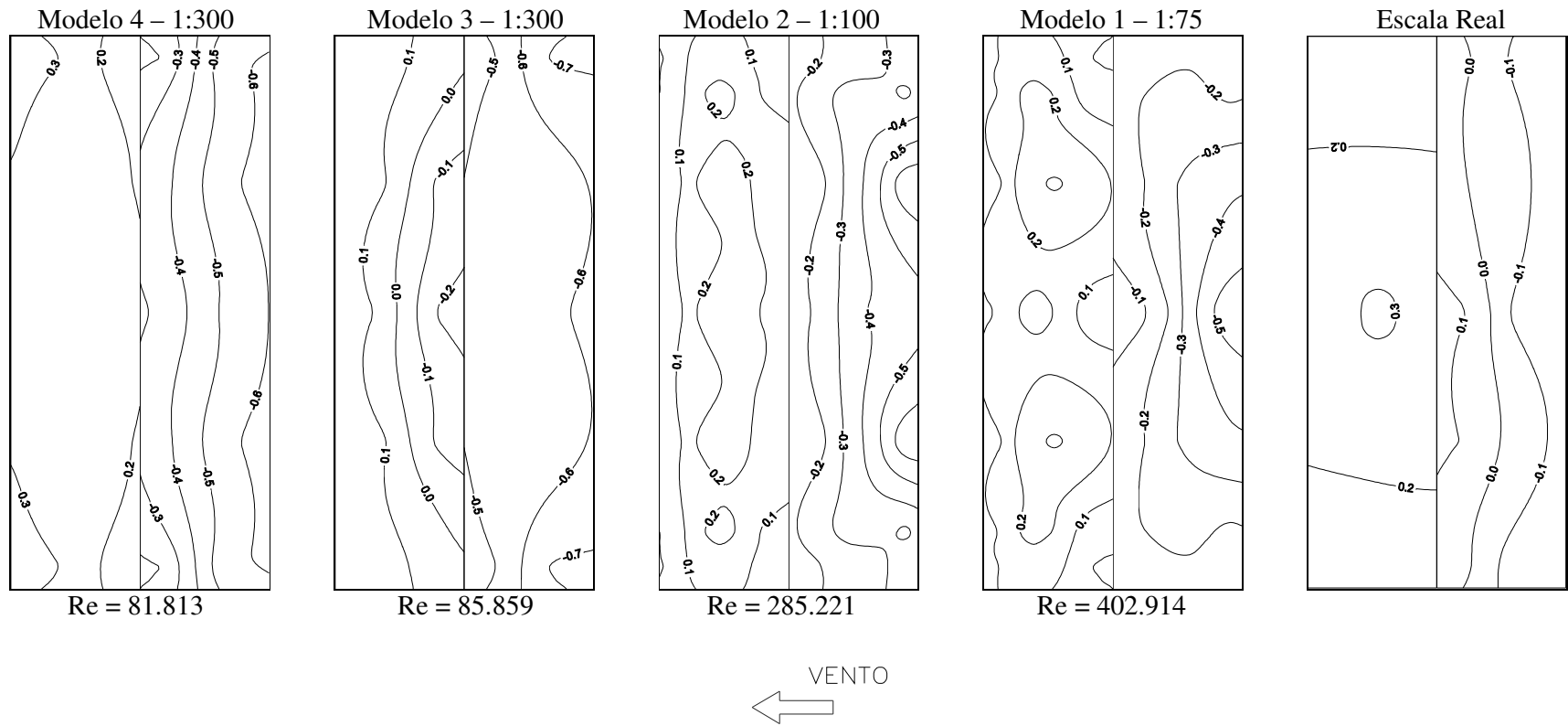


Figura 38: coeficientes de pressão interna para escoamento suave com ângulo de incidência de 90°, modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

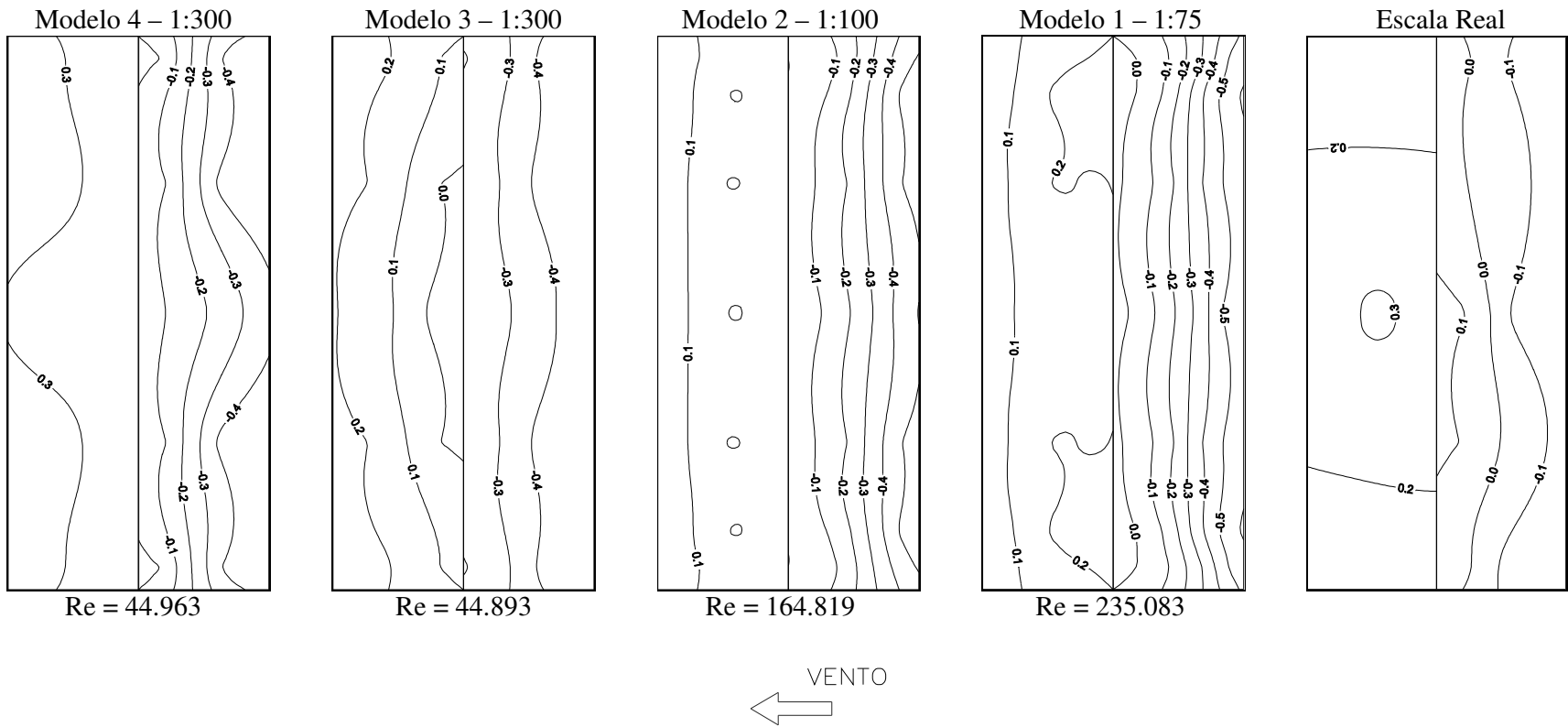


Figura 39: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizante e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 4, 3, 2, 1 e escala real

Na tabela 12 são apresentados os coeficientes de forma  $C$ , para cada água da cobertura, para um ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$  (perpendicular à cumeeira), correspondentes aos ensaios em túnel de vento, aos ensaios *in situ* efetuados por Robertson, Hoxey e Moran (1985) e os propostos pela Norma Brasileira.

Os coeficientes de forma  $C$ , para cada água da cobertura, foram calculados pela seguinte equação 27:

$$C = \frac{1}{A} \sum c_{pi} A_i \quad (\text{equação 27})$$

onde  $A_i$  é a área de influência de cada tomada de pressão e  $c_{pi}$  é a diferença dos coeficientes de pressão externo (superior) e interno (inferior) obtidos na respectiva tomada de pressão

A figura 40 indica os sentidos positivos dos coeficientes de forma.

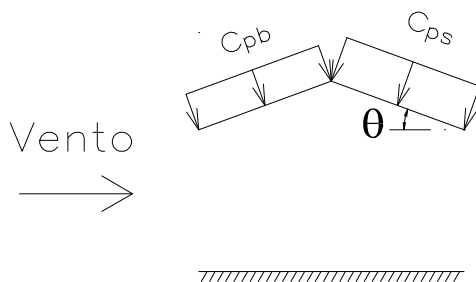


Figura 40: sentidos positivos dos coeficientes de forma

onde  $C_{pb}$  é o coeficiente de forma a barlavento e  $C_{ps}$  é o coeficiente de forma a sotavento.

Tabela 12: coeficientes de forma para um ângulo de incidência do vento de 90°, correspondente aos ensaios em túnel de vento, à indicação da norma brasileira e aos ensaios realizados *in situ*, por Robertson, Hoxey e Moran (1985)

	Escoamento Uniforme e Suave		Escoamento Uniforme e Turbulento		Escoamento Deslizante e Turbulento $\rho = 0,11$		Escoamento Deslizante e Turbulento $\rho = 0,23$		
	$C_{pb}$	$C_{ps}$	$C_{pb}$	$C_{ps}$	$C_{pb}$	$C_{ps}$	$C_{pb}$	$C_{ps}$	
Modelo 1	0,15	-0,37	0,09	-0,46	0,13	-0,34	0,13	-0,35	
Modelo 2	0,22	-0,35	0,13	-0,43	0,19	-0,35	0,15	-0,35	
Modelo 3	0,26	-0,36	0,21	-0,45	0,18	-0,29	0,12	-0,32	
Modelo 4	0,25	-0,42	0,24	-0,42	0,15	-0,36	0,11	-0,40	
Norma Brasileira	1° carreg	1,29	0,36	1,29	0,36	1,29	0,36	1,29	0,36
	2° carreg	-0,57	-1,00	-0,57	-1,00	-0,57	-1,00	-0,57	-1,00
Escala Real	-0,13	-0,45	-0,13	-0,45	-0,13	-0,45	-0,13	-0,45	

A análise dos resultados apresentados nesta tabela será realizada a seguir, no item 4 deste trabalho.

### 3.3 INDICAÇÕES DE NORMAS

Serão apresentados os resultados das indicações das normas apresentadas nos itens 1.4.3, 1.4.4 e 1.4.5. O ângulo de incidência do vento será conforme mostra a figura 22.

#### 3.3.1 Norma Francesa, NV-65 (1980)

A Norma Francesa indica coeficientes de pressão para o ângulo de incidência de 90° conforme mostra a figura 41 e para ângulo de incidência de 45° manda adicionar aos valores do primeiro caso uma sobrepressão uniforme de  $c_p = 0,5$  na face interior da cobertura, resultando no carregamento mostrado na figura 42.

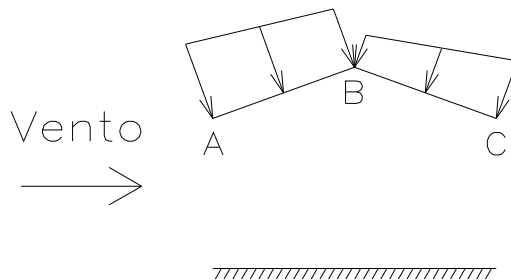


Figura 41: coeficientes de pressão indicados pela Norma Francesa para ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$

Onde os coeficientes a barlavento valem  $A=0,6$  e  $B=0,5$ , e os coeficientes a sotavento valem  $B=-0,2$  e  $C=-0,5$ .

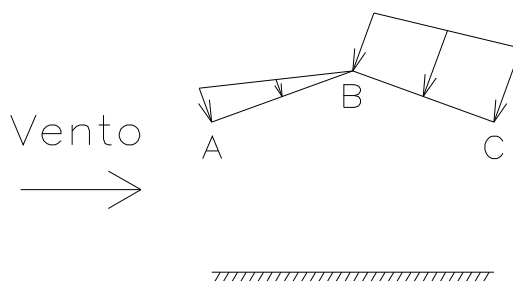


Figura 42: coeficientes de pressão indicados pela Norma Francesa para ângulo de incidência do vento de  $45^\circ$

Onde os coeficientes a barlavento valem  $A=0,1$  e  $B=0,0$ , e os coeficientes a sotavento valem  $B=-0,7$  e  $C=-1,0$ .

Para ângulo de incidência de  $0^\circ$ , a norma sugere considerar uma força horizontal de atrito aplicada a cada face, dado por:

$$F_{at} = 0,01q$$

sendo  $q$  a pressão dinâmica no nível superior da cobertura.



### 3.3.2 Norma da Convenção Européia de Construções Metálicas, CECM (1979)

A Norma da Convenção Européia de Construções Metálicas, CECM (1979), indica diretamente coeficientes de força aplicáveis a cada água da cobertura para o ângulo de incidência de  $90^\circ$ , conforme mostra a figura 43:

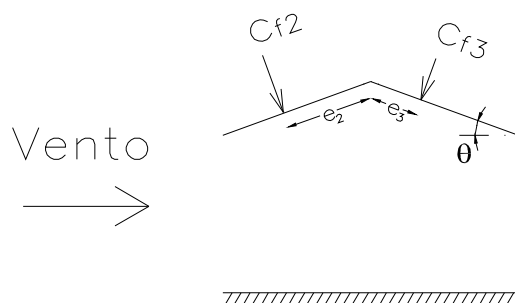


Figura 43: coeficientes de força indicados pela Norma CECM para ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$

Onde:

$$C_{f2} = 0,82 \quad \text{aplicado em} \quad e_2 = 3,43m$$

$$C_{f3} = -0,50 \quad \text{aplicado em} \quad e_3 = 2,29m$$

Os valores de  $e_2$  e  $e_3$ , em metros, foram calculados considerando as dimensões reais da cobertura, conforme mostra a figura 9.

Não há indicações para outros ângulos de incidência.

### 3.3.3 Norma da Suécia (1975)

A Norma da Suécia supõe uma distribuição uniforme de pressões, conforme mostra a figura 44:

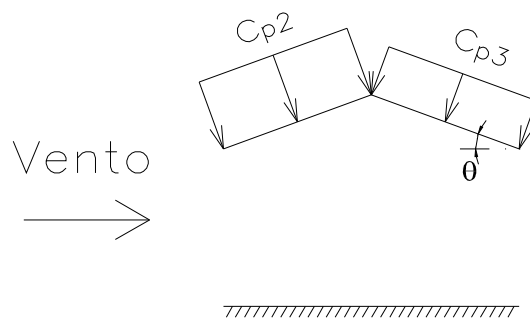


Figura 44: coeficientes de pressão indicados pela Norma da Suécia para ângulo de incidência do vento de  $45^\circ$

Onde  $c_{p2} = 0,82$  e  $c_{p3} = -0,50$ .

Não há indicações para outros ângulos de incidência.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A comparação dos resultados será feita entre os resultados dos ensaios, as medições *in situ* realizadas por Robertson, Hoxey e Moran (1985) e os modelos de Normas de maneira que seja possível avaliar:

- A influência da escala do modelo nos resultados de ensaios em túnel de vento;
- O efeito do tipo de escoamento nas ações estáticas exercidas pelo vento em coberturas isoladas a duas águas;
- A influência da espessura do telhado do modelo nos resultados de ensaios em túnel de vento;
- A aplicabilidade do modelo sugerido pela Norma Brasileira para a determinação da ação estática do vento em coberturas isoladas.

### 4.1 EFEITO DO TIPO DE ESCOAMENTO NAS AÇÕES ESTÁTICAS EXERCIDAS PELO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS A DUAS ÁGUAS

#### 4.1.1 Pressão externa (superior)

Comparando as curvas isobáricas obtidas no escoamento uniforme e suave e as obtidas com escoamento deslizante e turbulento com  $p = 0,23$ , pode-se observar que:

- Para um ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$ , a presença da turbulência e do gradiente vertical de velocidades (vento deslizante e turbulento com  $p = 0,23$ ) alteram de forma significativa, em todos os modelos, a distribuição espacial dos coeficientes de pressão (forma ou padrão das curvas isobáricas) na água a sotavento, em relação aos resultados obtidos com vento uniforme e suave (comparar figuras 32 e 33).

- Para um ângulo de incidência de  $45^\circ$ , o escoamento deslizante e turbulento com  $p = 0,23$ , reduz de forma significativa, em todos os modelos, a magnitude dos coeficientes de pressão mínimos (coeficientes de pressão negativos de máxima magnitude) na água a sotavento (comparar figuras 30 e 31).
- Para um ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$ , também foram observadas alterações na distribuição espacial e magnitude dos coeficientes de pressão. Entretanto, essas alterações não foram tão significativas como nos casos anteriores (comparar figuras 28 e 29).

#### 4.1.2 Pressão interna (inferior)

Comparando as curvas isobáricas obtidas no escoamento uniforme e suave e as obtidas com escoamento deslizante e turbulento com  $p = 0,23$ , pode-se observar que:

- Para um ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$ , a presença da turbulência e do gradiente vertical de velocidades (vento deslizante e turbulento com  $p = 0,23$ ) alteram de forma significativa, em todos os modelos, a distribuição espacial (forma ou padrão das curvas isobáricas) e a magnitude dos coeficientes de pressão nas duas águas da cobertura (comparar figuras 38 e 39).
- Para um ângulo de incidência de  $45^\circ$ , o escoamento deslizante e turbulento com  $p = 0,23$ , reduz de forma significativa, nos modelos 1, 2 e 3, a magnitude dos coeficientes de pressão mínimos (coeficientes de pressão negativos de máxima magnitude) (comparar figuras 36 e 37).
- Para um ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$ , também foram observadas alterações na distribuição espacial e na magnitude dos coeficientes de pressão. Entretanto, essas alterações não foram tão significativas como nos casos anteriores (comparar figuras 34 e 35).

Comparando os coeficientes de forma  $C$ , apresentados na tabela 12, para um ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$ , pode-se observar que:

- Coeficiente de forma na água a barlavento: os maiores valores de  $C_{pb}$  (todos eles positivos) foram medidos nos ensaios com escoamento uniforme e suave. Os resultados indicam, no caso dos modelos 3 e 4, a existência de uma forte correlação entre  $C_{pb}$  e o tipo de escoamento, verificando-se que quanto mais turbulento e deslizando for o escoamento menor resulta  $C_{pb}$ .
- Coeficiente de forma na água de sotavento: as maiores magnitudes de  $C_{ps}$  (todos eles negativos) foram medidas nos ensaios com escoamento uniforme e turbulento.

## 4.2 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO TELHADO DO MODELO NOS RESULTADOS DE ENSAIOS EM TUNEL DE VENTO

Comparando as curvas isobáricas obtidas no escoamento uniforme e suave e as obtidas no escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,23$ , pode-se observar que:

- A mudança da espessura do telhado, de 2,0mm (modelo 3) para 0,5mm (modelo 4) provocou alterações significativas na distribuição espacial (forma ou padrão das curvas isobáricas) e na magnitude dos coeficientes de pressão externos ou internos, para ângulos de incidência do vento de  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . Essas alterações significativas foram constatadas nos resultados dos ensaios indicados nas figuras 30, 32, 33, 36, 38 e 39.

Entretanto, os coeficientes de forma  $C$  calculados para os modelos 3 e 4, para os diferentes tipos de escoamento, não apresentam diferenças significativas, conforme mostra a tabela 12.

## 4.3 INFLUÊNCIA DA ESCALA DO MODELO NOS RESULTADOS DE ENSAIOS EM TUNEL DE VENTO

Quando comparados os resultados correspondentes aos modelos 1 e 2 com os resultados do modelo 3, constata-se uma forte influência da escala do modelo na distribuição espacial (forma ou padrão das curvas isobáricas) e na magnitude dos coeficientes de pressão

(externos e internos), para todos os ângulos de incidência do vento e tipos de escoamento (ver figuras 28 a 39).

No caso do escoamento uniforme e suave e do escoamento uniforme e turbulento, os coeficientes de forma na água a barlavento,  $C_{pb}$ , indicam a existência de uma forte correlação entre o coeficiente de forma e a escala do modelo, verificando-se que quanto maior for o modelo menor resulta  $C_{pb}$ . Mais ainda, para nenhuma simulação foram obtidos coeficientes de forma  $C_{pb}$  negativos como o obtido nas medições *in situ*. Entretanto os coeficientes de forma na água a sotavento,  $C_{ps}$ , são razoavelmente próximos ao obtido nas medições do protótipo, independentemente do tamanho do modelo e do tipo de escoamento.

Quando comparados os resultados dos ensaios em túnel de vento com os obtidos *in situ*, por Robertson, Hoxey e Moran (1985), observa-se que as melhores simulações foram obtidas com:

- O modelo 3, para as pressões externas e ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$ , num escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,23$  (ver figura 29).
- O modelo 1, para as pressões externas e ângulo de incidência do vento de  $45^\circ$ , num escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,23$  (ver figura 31).
- O modelo 1, para as pressões externas e ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$ , num escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,23$  (ver figura 33).
- Os modelos 3 e 4, para as pressões internas e ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$ , num escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,23$  (ver figura 35).
- O modelo 1, para as pressões internas e ângulo de incidência do vento de  $45^\circ$ , num escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,23$  (ver figura 37).
- O modelo 1, para as pressões internas e ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$ , num escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,23$  (ver figura 39).

Observar que as simulações apresentam maior deficiência na reprodução das pressões inferiores ou internas, medidas *in situ*, para ângulos de incidência do vento de  $45^\circ$  e  $90^\circ$  (ver figuras 37 e 39).

Como os parâmetros aerodinâmicos de projeto sugeridos em normas de vento são calculados como médias espaciais dos coeficientes de pressão, as diferenças observadas, empregando modelos de diferentes escalas ou ensaiados em diferentes tipos de escoamento, são suavizadas. Por exemplo, os coeficientes de forma obtidos nos ensaios com escoamento deslizando e turbulento com  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ , são sensivelmente iguais (ver tabela 12).

#### 4.4 APLICABILIDADE DO MODELO SUGERIDO PELA NORMA BRASILEIRA PARA A DETERMINAÇÃO DA AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS

Os coeficientes de forma obtidos a partir das medições *in situ* estão de acordo com o denominado 2º carregamento sugerido pela Norma Brasileira. Entretanto, os valores sugeridos pela norma podem ser considerados conservadores, conforme mostra a tabela 12.

Nos ensaios realizados em túnel de vento não foi possível observar o duplo estado de carregamento sugerido pela Norma Brasileira.

#### 4.5 APLICABILIDADE DOS MODELOS DE NORMAS APRESENTADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS

Comparando os coeficientes de pressão apresentados para cada norma notou-se que os valores apresentados pela Norma Brasileira NBR 6123 foram os mais elevados. Todas as normas apresentadas neste trabalho indicam coeficientes maiores do que os coeficientes de forma calculados com os resultados encontrados nos ensaios em túnel de vento, apresentados na tabela 12.

## 5 CONCLUSÕES

Através dos ensaios realizados neste trabalho, buscou-se a compreensão do comportamento de coberturas isoladas a duas águas frente à ação do vento, já que a maioria dos acidentes causados pelo vento ocorre em construções deste tipo.

A partir dos resultados apresentados neste trabalho e da análise dos mesmos, pode-se concluir que:

- Para ângulos de incidência do vento de 45° e 90°, as características do escoamento influem marcadamente nas ações estáticas do vento em coberturas isoladas a duas águas.
- Para ângulos de incidência do vento de 45° e 90°, a espessura do telhado do modelo, ou seja, espessura relativa,  $\varphi_{Th}$ , pode alterar significativamente os resultados dos ensaios realizados em túnel de vento.
- A escala do modelo exerce uma forte influência nos resultados dos ensaios em túnel de vento para todos os ângulos de incidência do vento e tipos de escoamento, ou seja, é o parâmetro que mais influencia nos resultados de ensaios em modelos reduzidos.
- Ao menos para o modelo de cobertura a duas águas ensaiado neste trabalho, os coeficientes aerodinâmicos de projeto (coeficientes de forma) sugeridos pela Norma Brasileira são aceitáveis quando comparados com os medidos *in situ*.
- Uma reprodução aceitável das ações estáticas do vento em modelos de coberturas isoladas a serem ensaiados em túnel de vento, exige:
  - O emprego de um modelo com escala não menor a 1:100,
  - Efetuar o ensaio da cobertura num escoamento deslizando e turbulento.



## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas a seguir.

- Ensaios em modelos com diferentes escalas;
- Ensaios em modelos com variações do diâmetro relativo,  $\varphi_D$ , e da espessura relativa,  $\varphi_{Th}$ , para verificação da influência destes parâmetros;
- Ensaios em modelos com diferentes ângulos de inclinação da cobertura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento**. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 2001.

\_\_\_\_. **Aerodinâmica das Construções**. Porto Alegre: Sagra, 1990a.

\_\_\_\_. **Tópicos de normas de vento**. Série Engenharia Estrutural 6. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 1990b.

\_\_\_\_. **Vento em coberturas planas isoladas**. Caderno de Engenharia CE-1, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1985.

\_\_\_\_. The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 10, p.231-248, 1982.

COOK, N. J. **The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: static structures**. London: Butterworths, 1990.

DAVENPORT, A. G.; ISYUMOV, N. The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading. **Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures**. Ottawa, Canada, September 11-15, vol. 1. p.201-230, 1967.

GINGER, J. D.; LETCHFORD, C. W. Peak wind loads under delta wing vortices on canopy roofs. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 41-44, p.1739-1750, 1992.

GUMLEY, S. J. A parametric study of extreme pressures for static design of canopy structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 16, p.43-56, 1984.

IRMINGER, J. O. V., NOKKENTVED, C. **Wind pressures on buildings. Experimental researches. Second series.** Copenhagen, 1936.

LETCHFORD, C. W.; GINGER, J. D. Wind loads on planar canopy roofs – Part 1: Mean pressure distributions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 45, p.25-45, 1992.

NÚÑEZ, G. J. Z. **Determinação experimental e teórica da resposta transversal à ação do vento de uma torre de telecomunicações de concreto armado.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NATALINI, B.; MARIGHETTI, J. O.; NATALINI, M. B. Wind tunnel modeling of mean pressures on canopy roof. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 90, p.427-439, 2002.

ROBERTSON, A. P. Design wind loads for ridged canopy roof structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 24, p.185-192, 1986.

ROBERTSON, A. P.; MORAN, P. Comparisons of full-scale and wind-tunnel measurements of wind loads on a free-standing canopy roof structure. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 23, p.113-125, 1986.

ROBERTSON, A. P.; HOXEY, R. P.; MORAN, P. A full-scale study of wind loads on agricultural ridged canopy roof structures and proposals for design. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 21, p.167-205, 1985.

SIMIU, E. **Wind effects on structures: an introduction to wind engineering.** New York: John Wiley, 1978.

## **Anexo 1 – Resultados obtidos nos ensaios**

## 1.1 RESULTADOS OBTIDOS

A seguir os resultados obtidos nos ensaios realizados em túnel de vento. Os resultados serão apresentados em forma de curvas de pressão.

### 1.1.1 Coeficientes de pressão externa (superior)

Escoamento uniforme e suave – ângulo de incidência  $0^\circ$

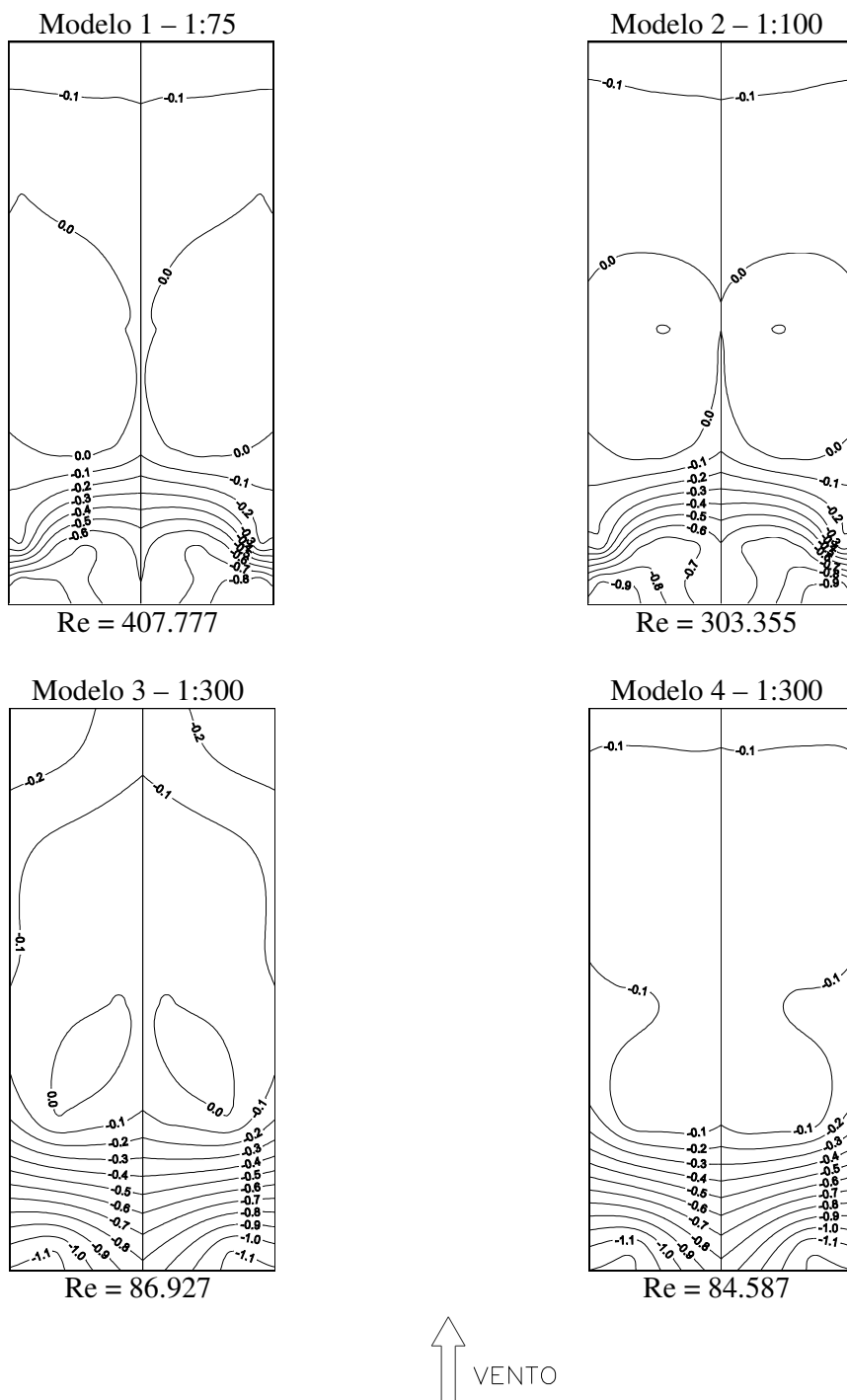


Figura 45: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento uniforme e suave – ângulo de incidência 45°

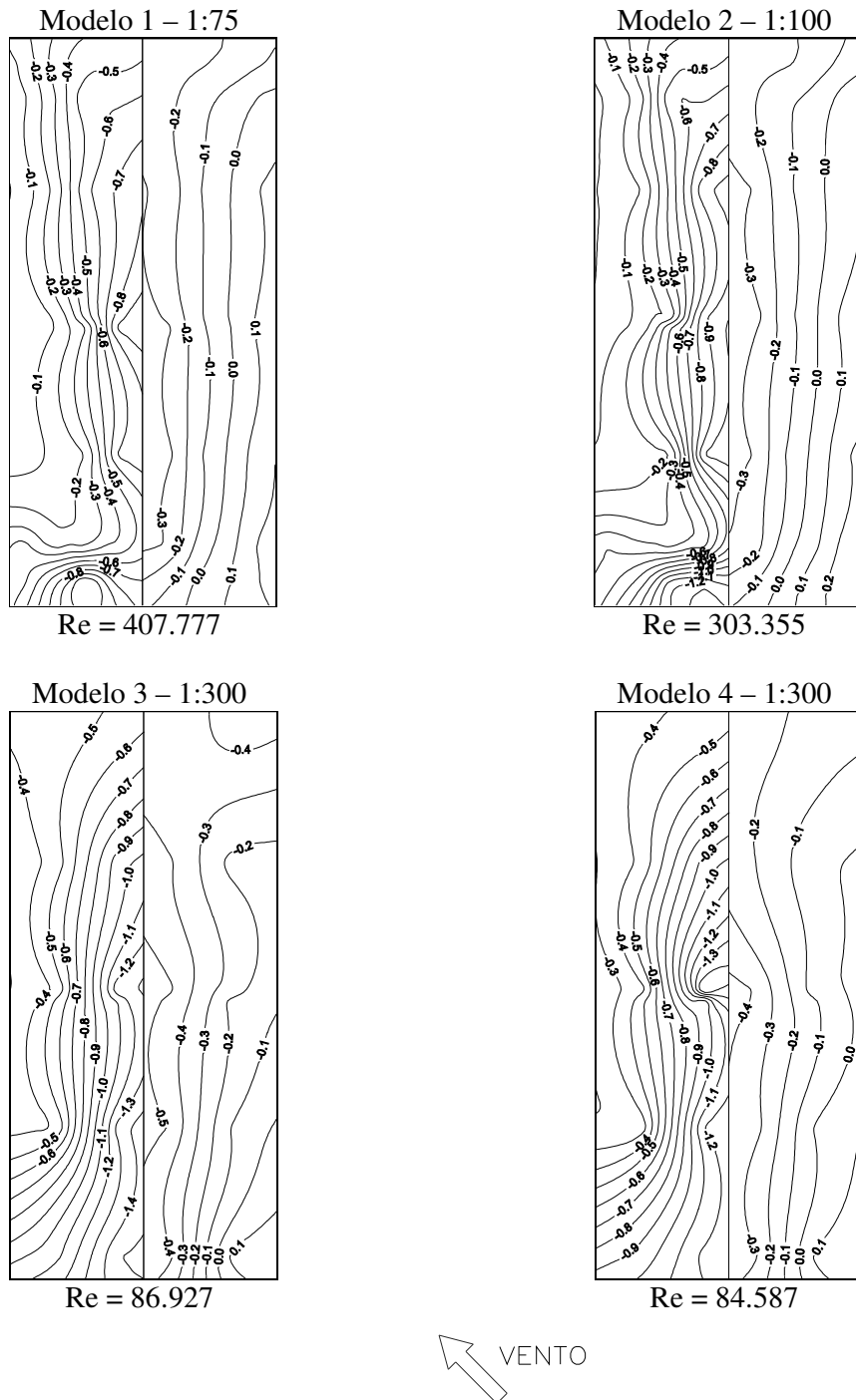


Figura 46: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de 45°, modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento uniforme e suave – ângulo de incidência  $90^\circ$

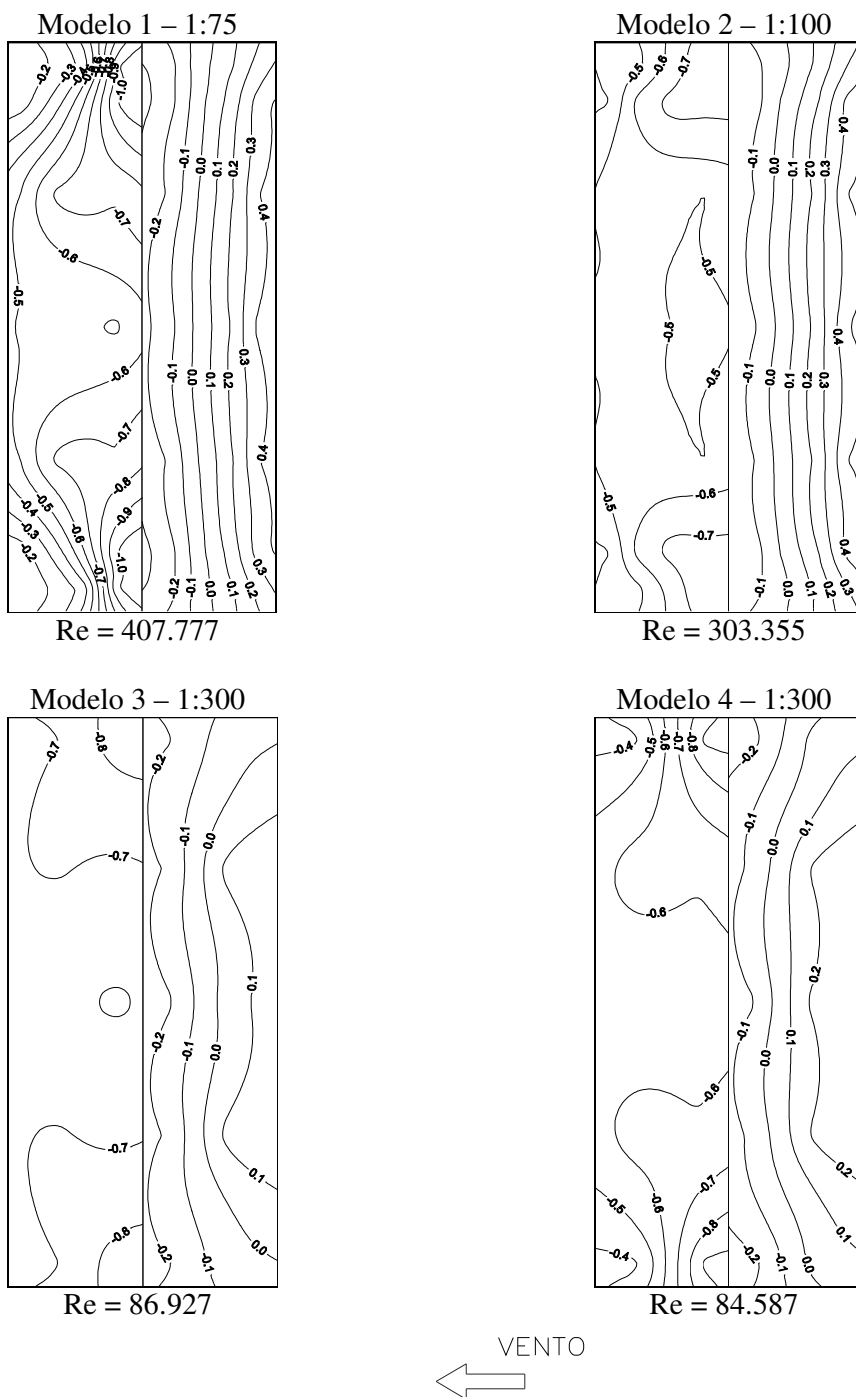


Figura 47: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4



Escoamento uniforme e turbulento – ângulo de incidência  $0^\circ$

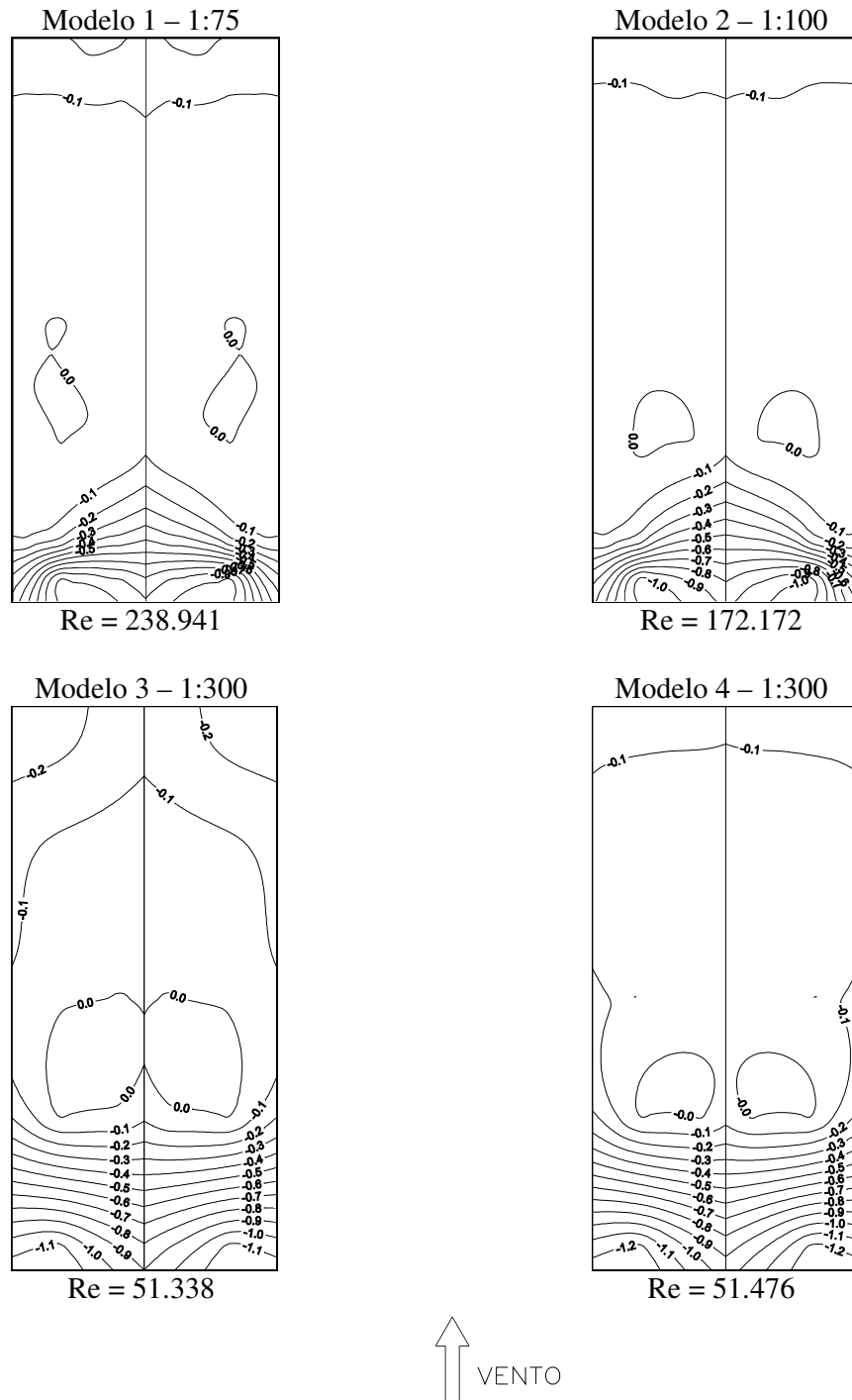


Figura 48: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

## Escoamento uniforme e turbulento – ângulo de incidência 45°

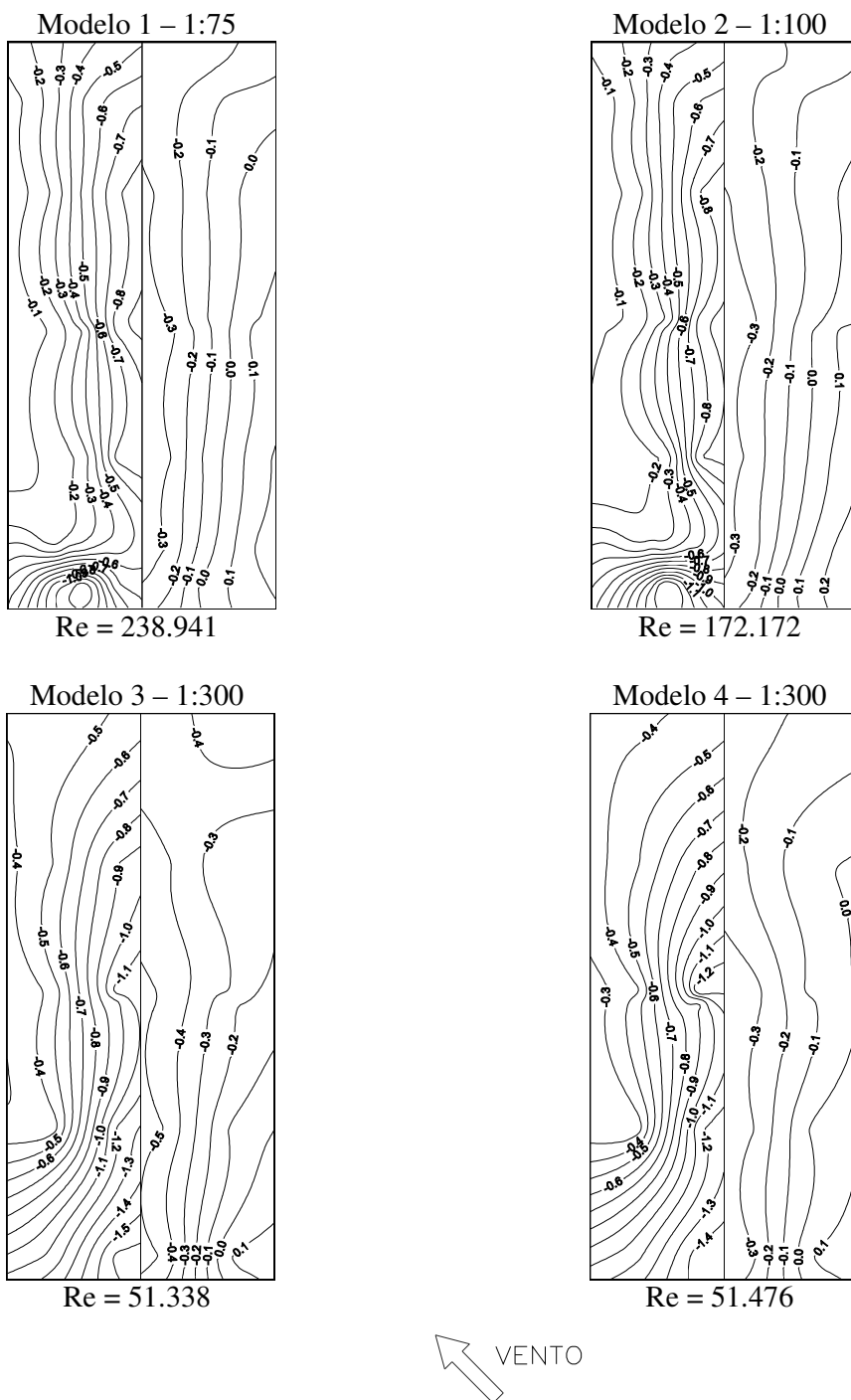


Figura 49: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de 45°, modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento uniforme e turbulento – ângulo de incidência  $90^\circ$

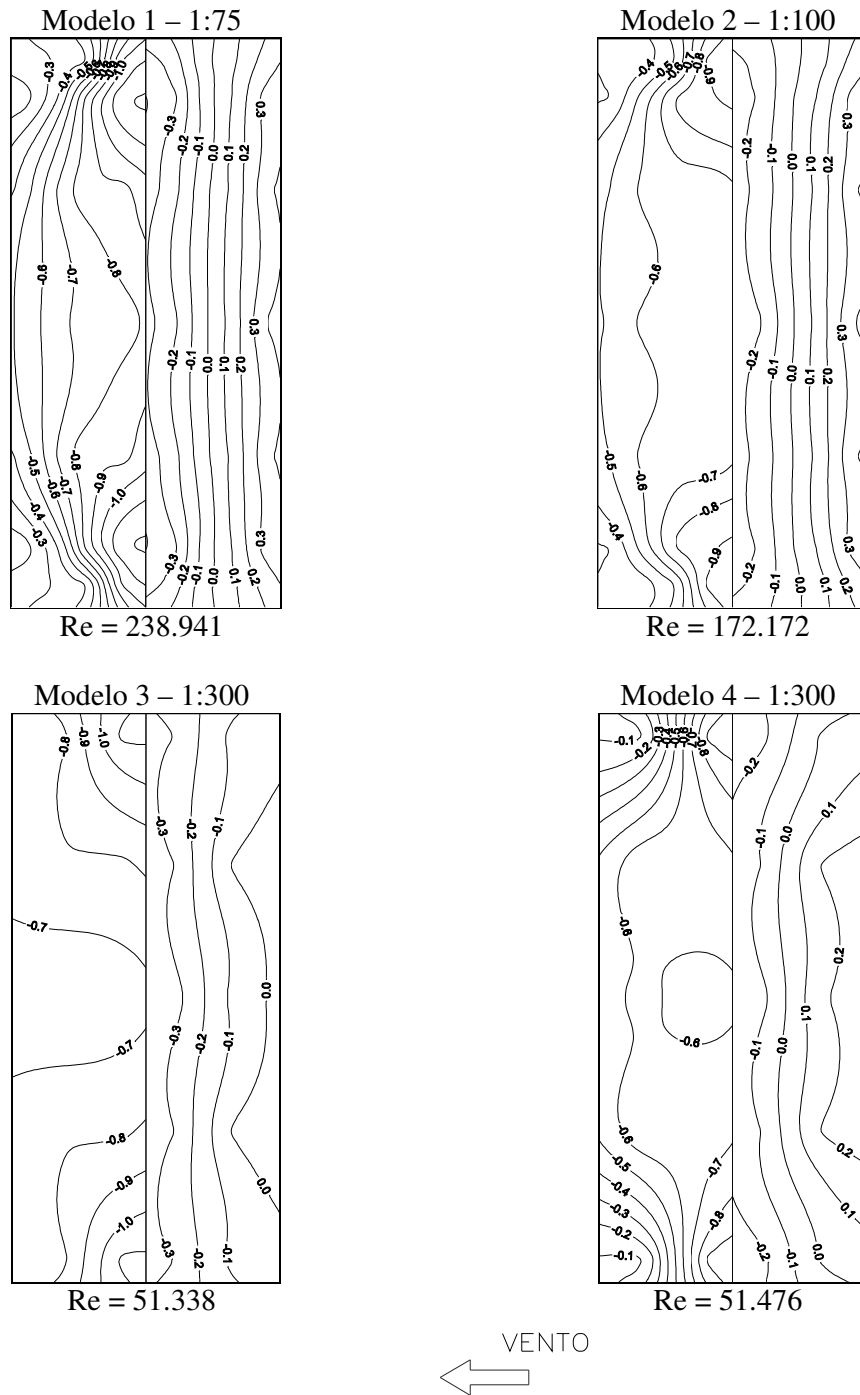


Figura 50: coeficientes de pressão externa para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,11$  – ângulo de incidência  $0^\circ$

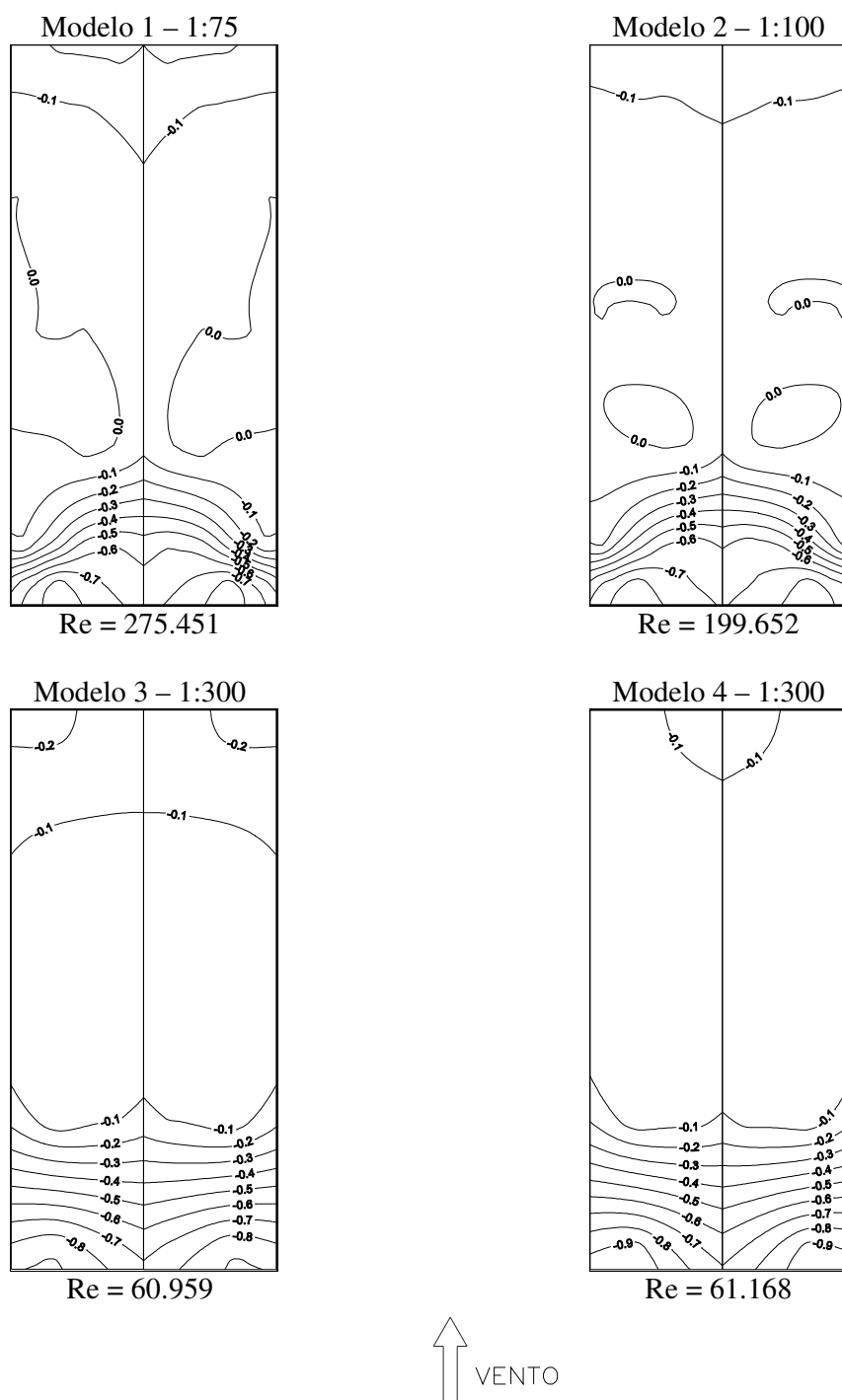


Figura 51: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,11$  com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,11$  – ângulo de incidência  $45^\circ$

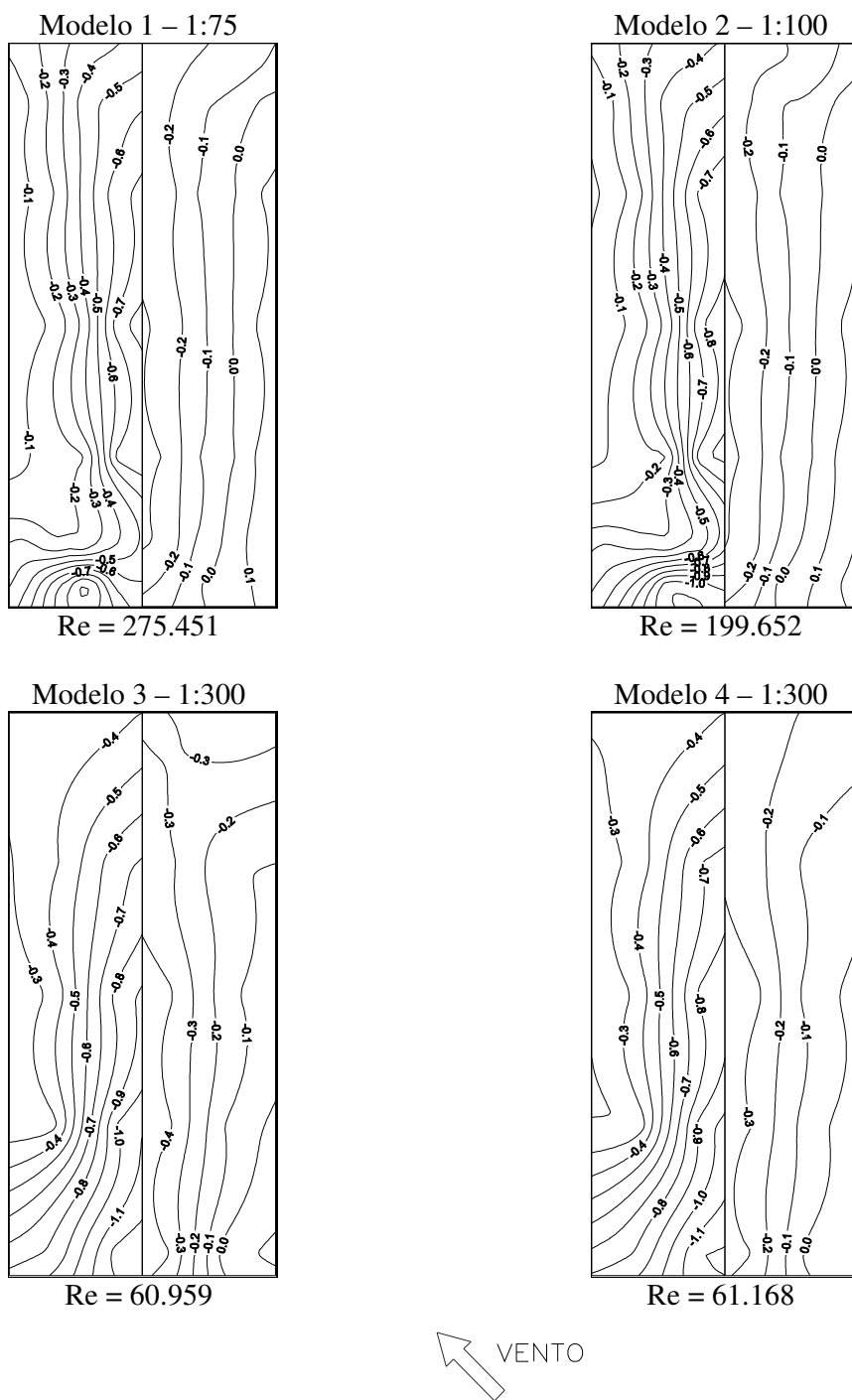


Figura 52: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,11$  com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,11$  – ângulo de incidência  $90^\circ$

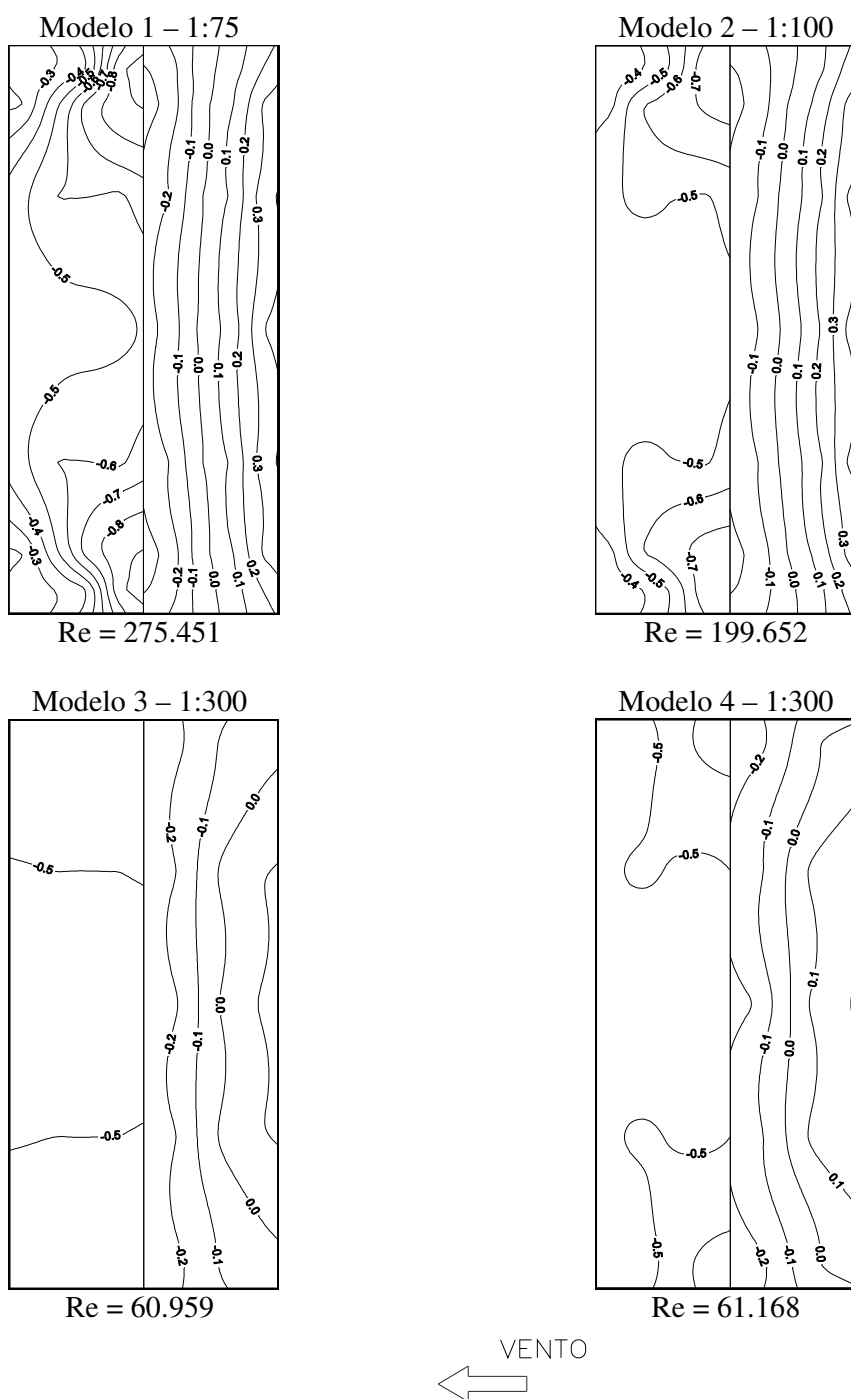


Figura 53: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,11$  com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  – ângulo de incidência  $0^\circ$

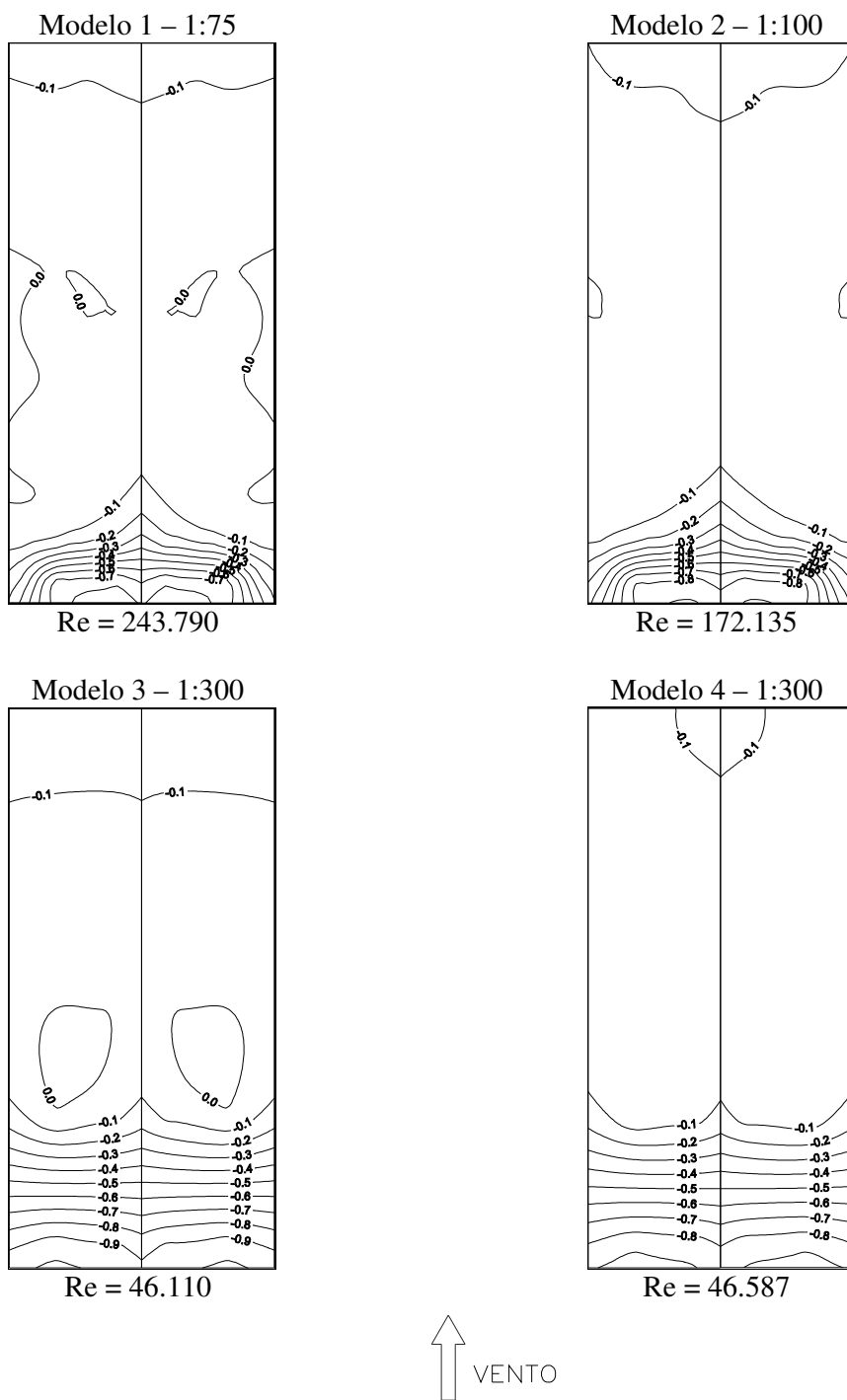


Figura 54: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  – ângulo de incidência  $45^\circ$

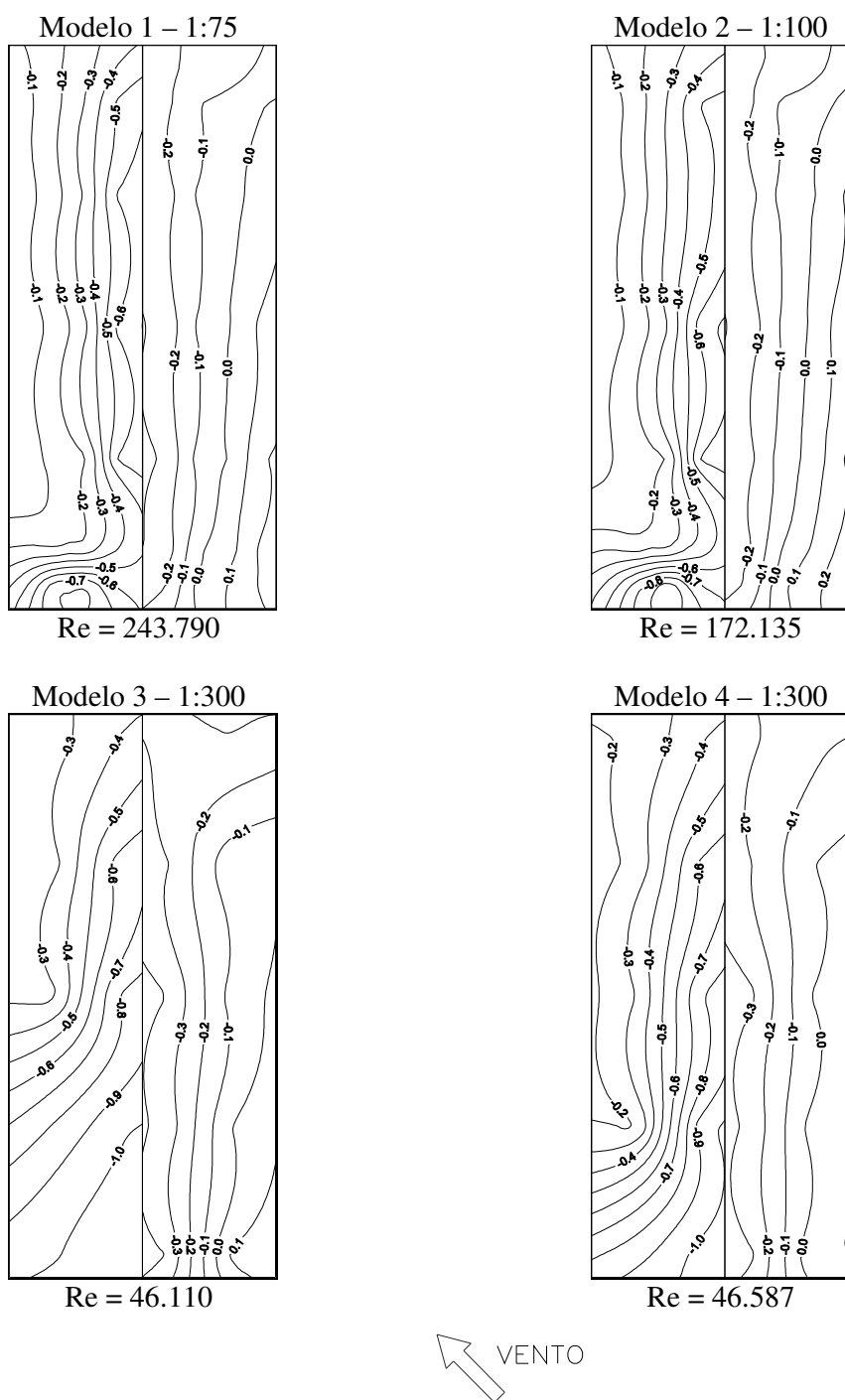


Figura 55: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4



Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  – ângulo de incidência  $90^\circ$

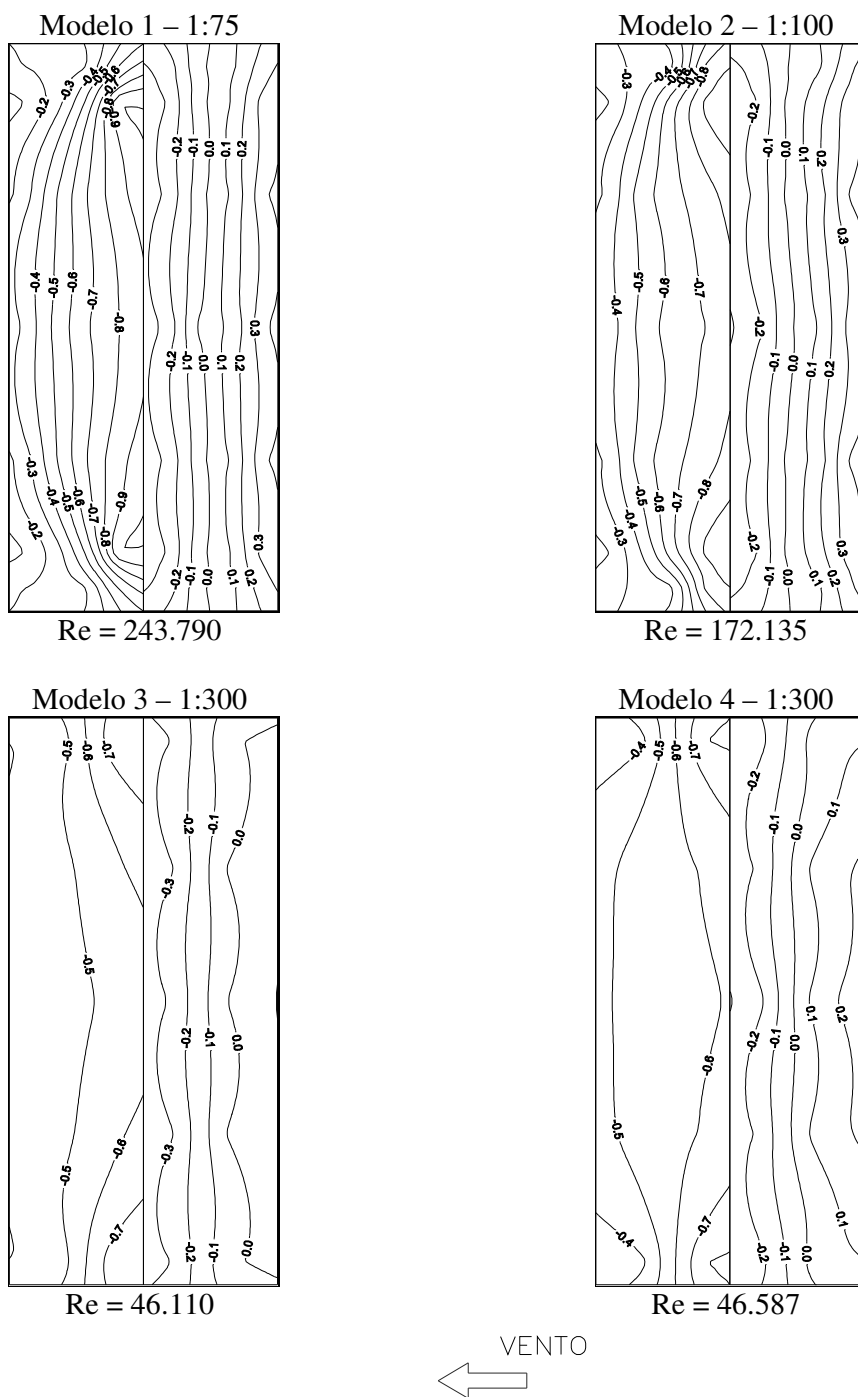
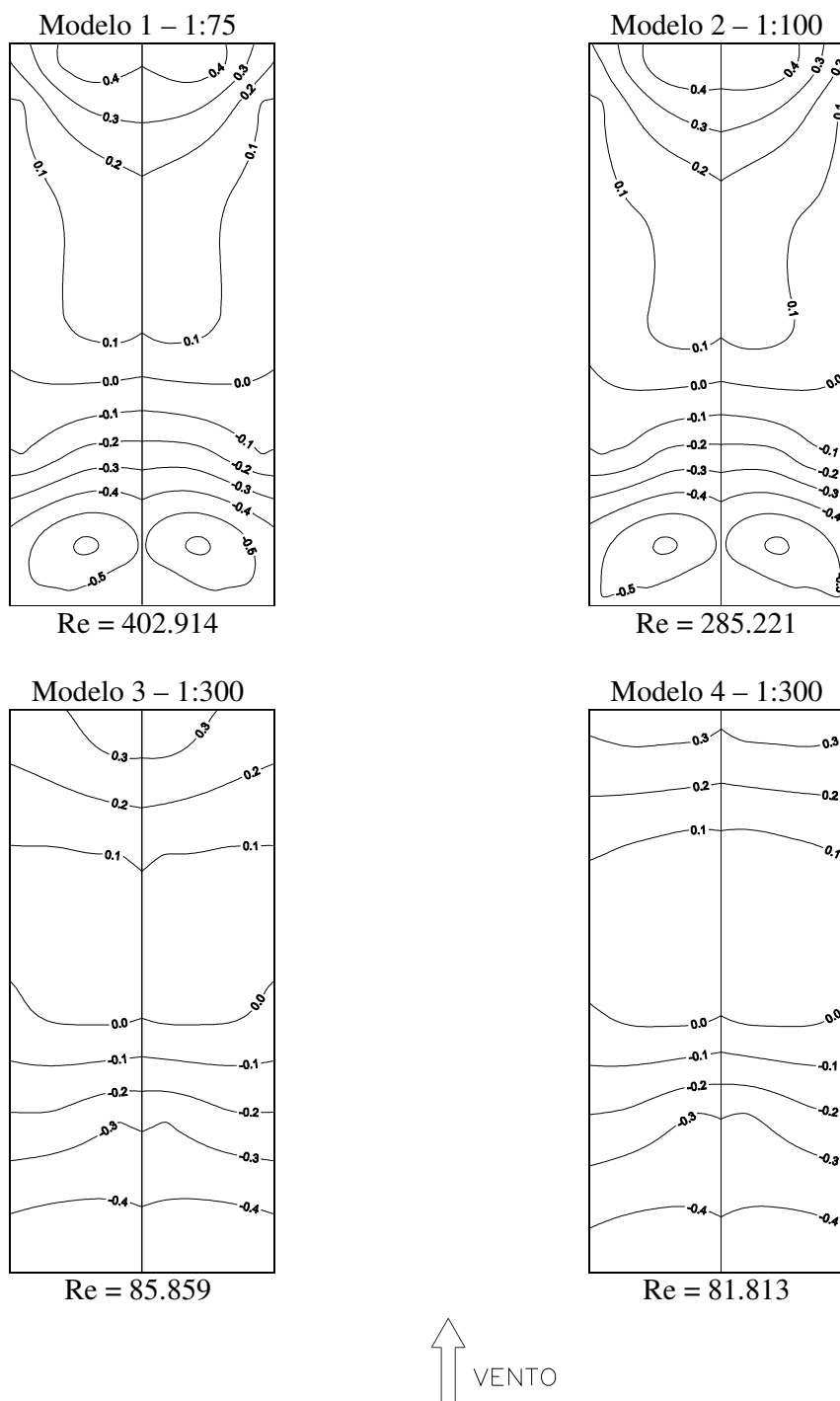


Figura 56: coeficientes de pressão externa para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

## 1.1.2 Coeficientes de pressão interna (inferior)

Escoamento uniforme e suave – ângulo de incidência  $0^\circ$ Figura 57: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento uniforme e suave – ângulo de incidência  $45^\circ$

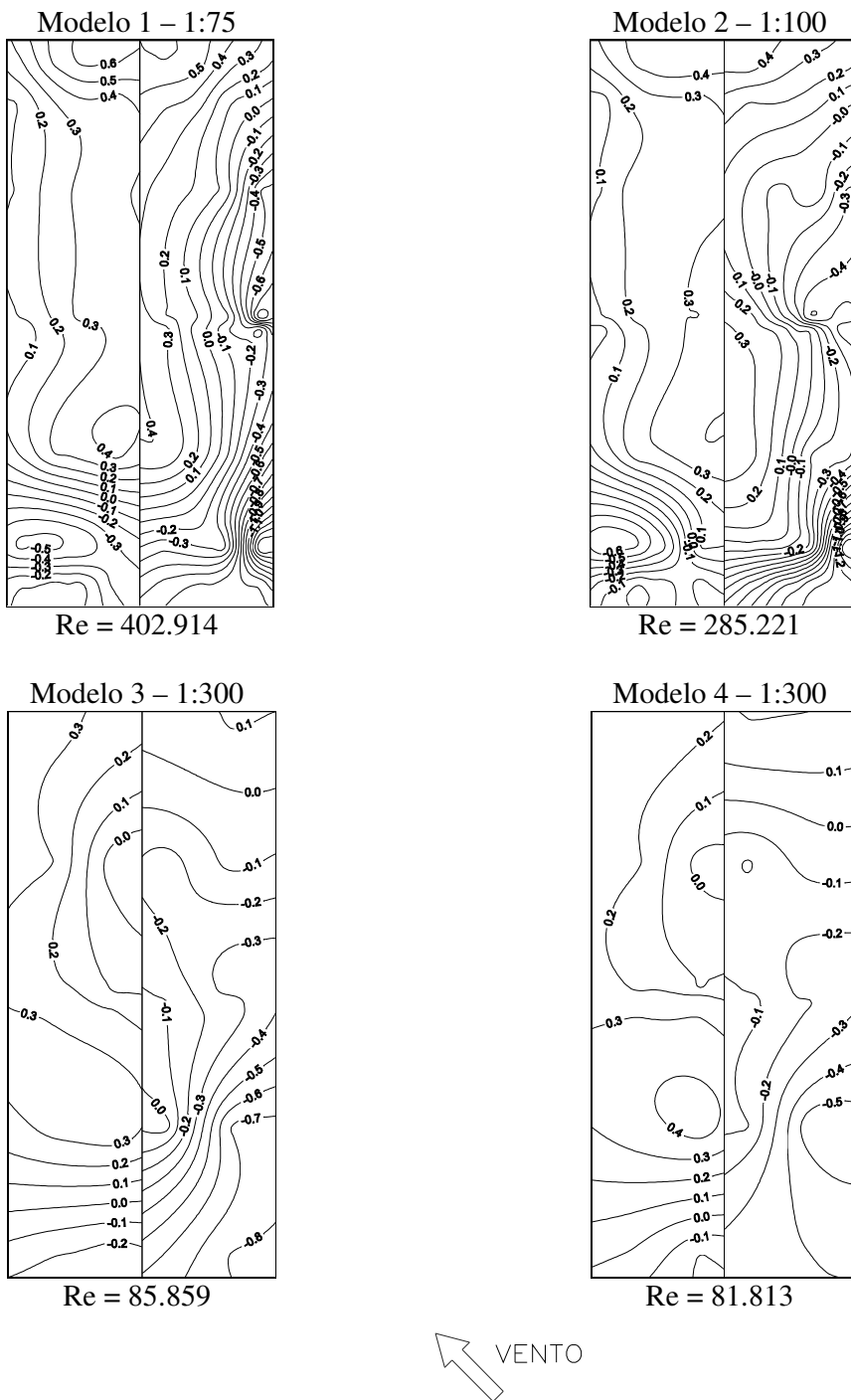


Figura 58: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento uniforme e suave – ângulo de incidência  $90^\circ$

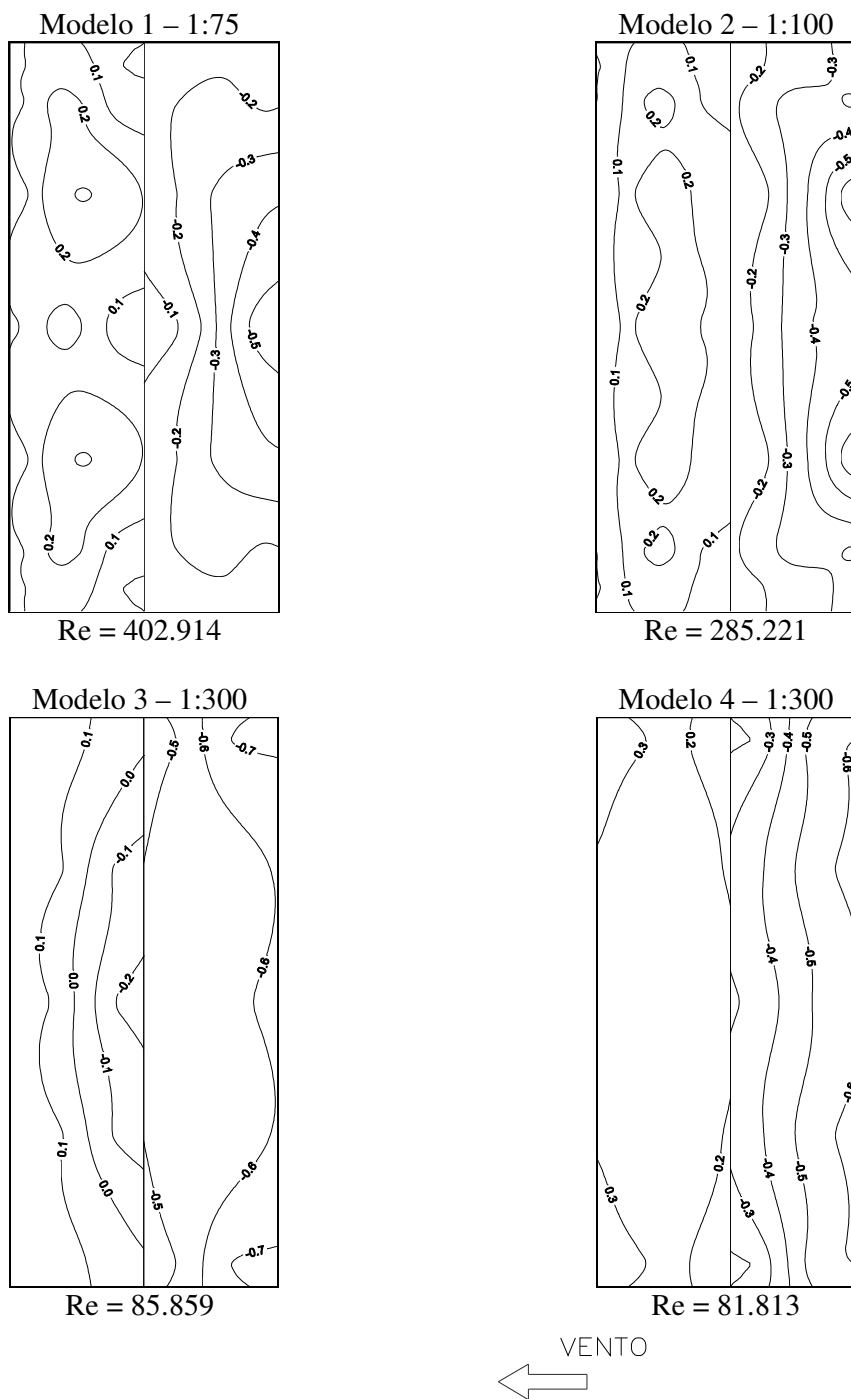


Figura 59: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e suave com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento uniforme e turbulento – ângulo de incidência  $0^\circ$

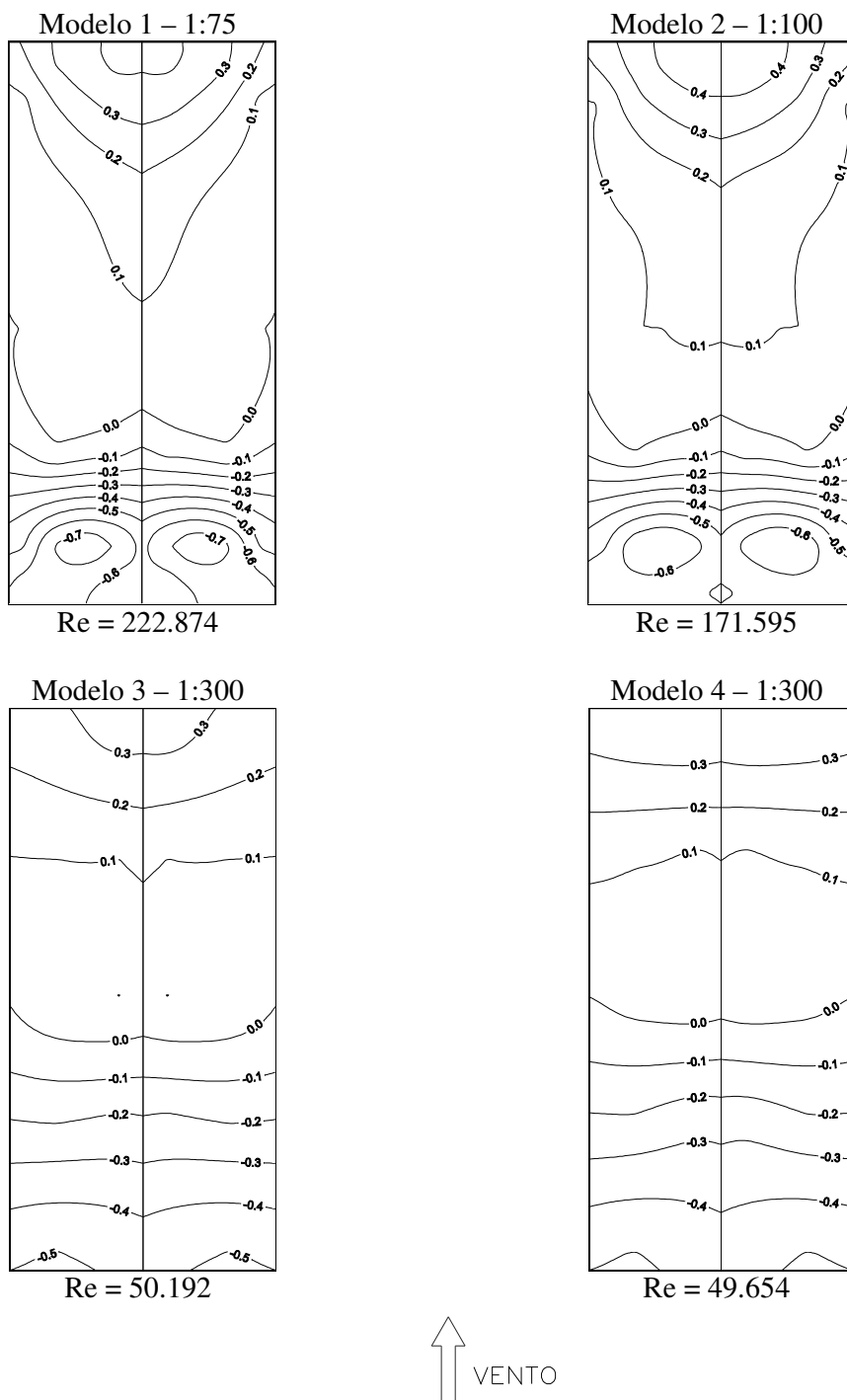


Figura 60: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

## Escoamento uniforme e turbulento – ângulo de incidência 45°

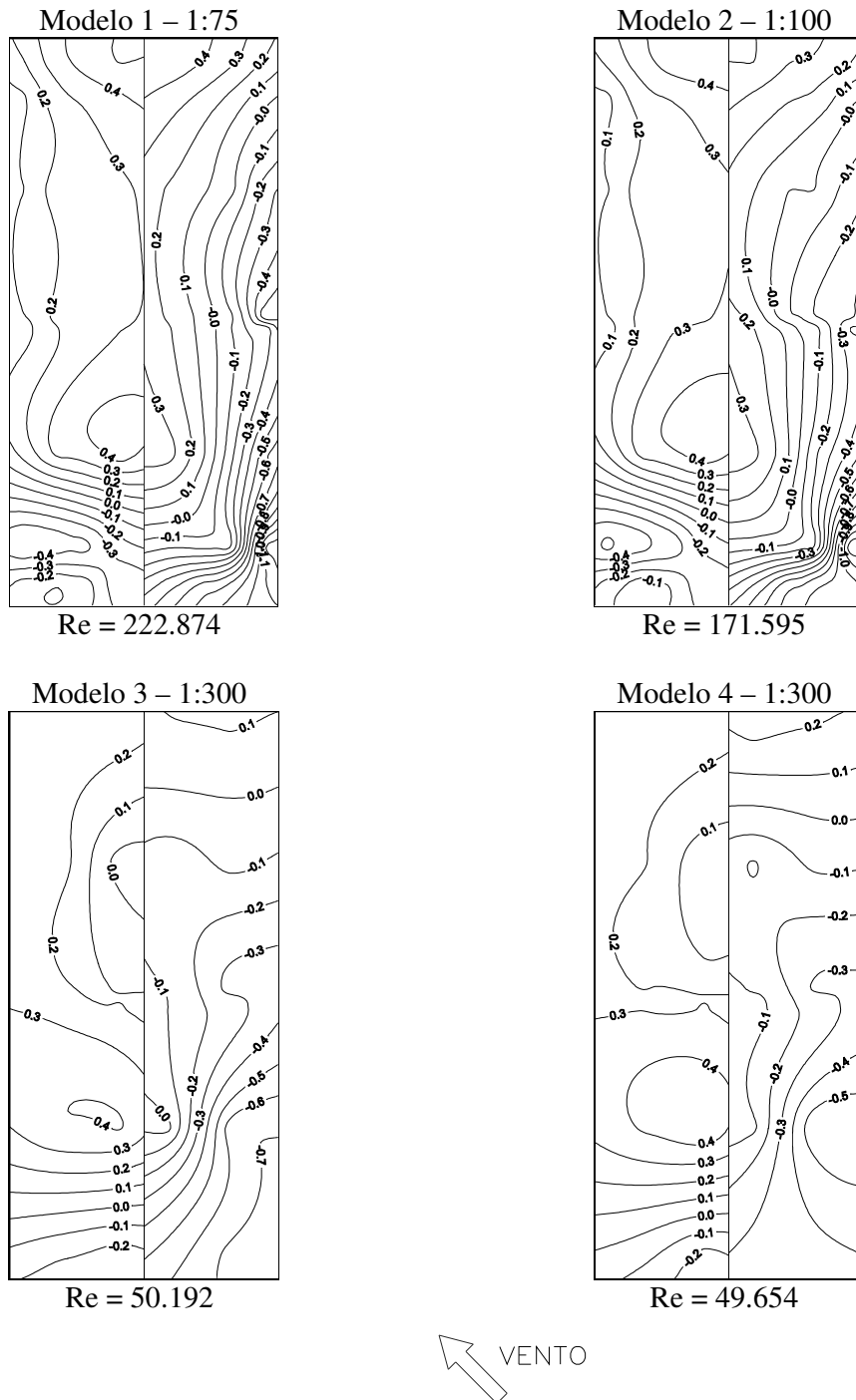


Figura 61: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de 45°, modelos 1, 2, 3 e 4

## Escoamento uniforme e turbulento – ângulo de incidência 90°

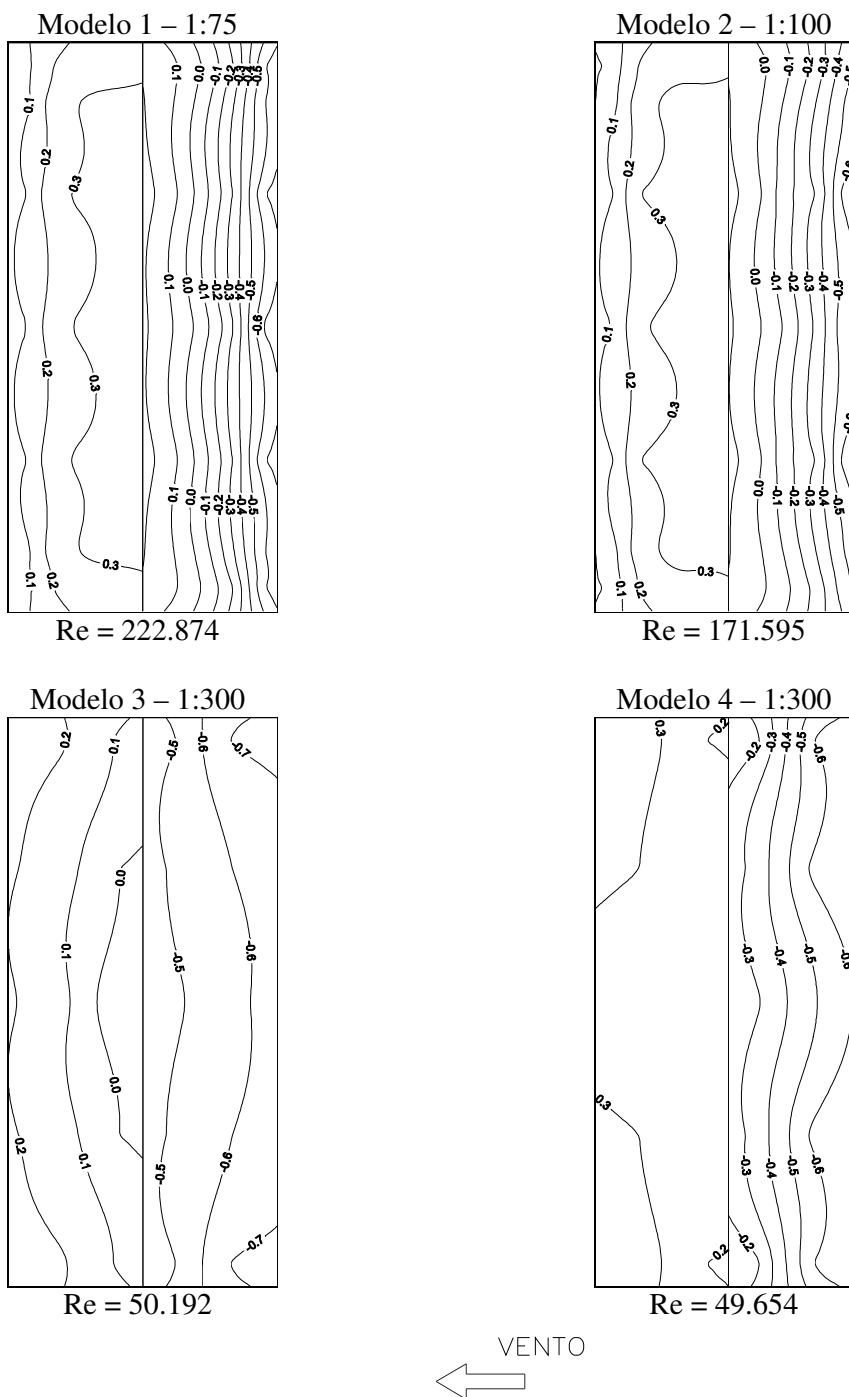


Figura 62: coeficientes de pressão interna para escoamento uniforme e turbulento com ângulo de incidência de 90°, modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,11$  – ângulo de incidência  $0^\circ$

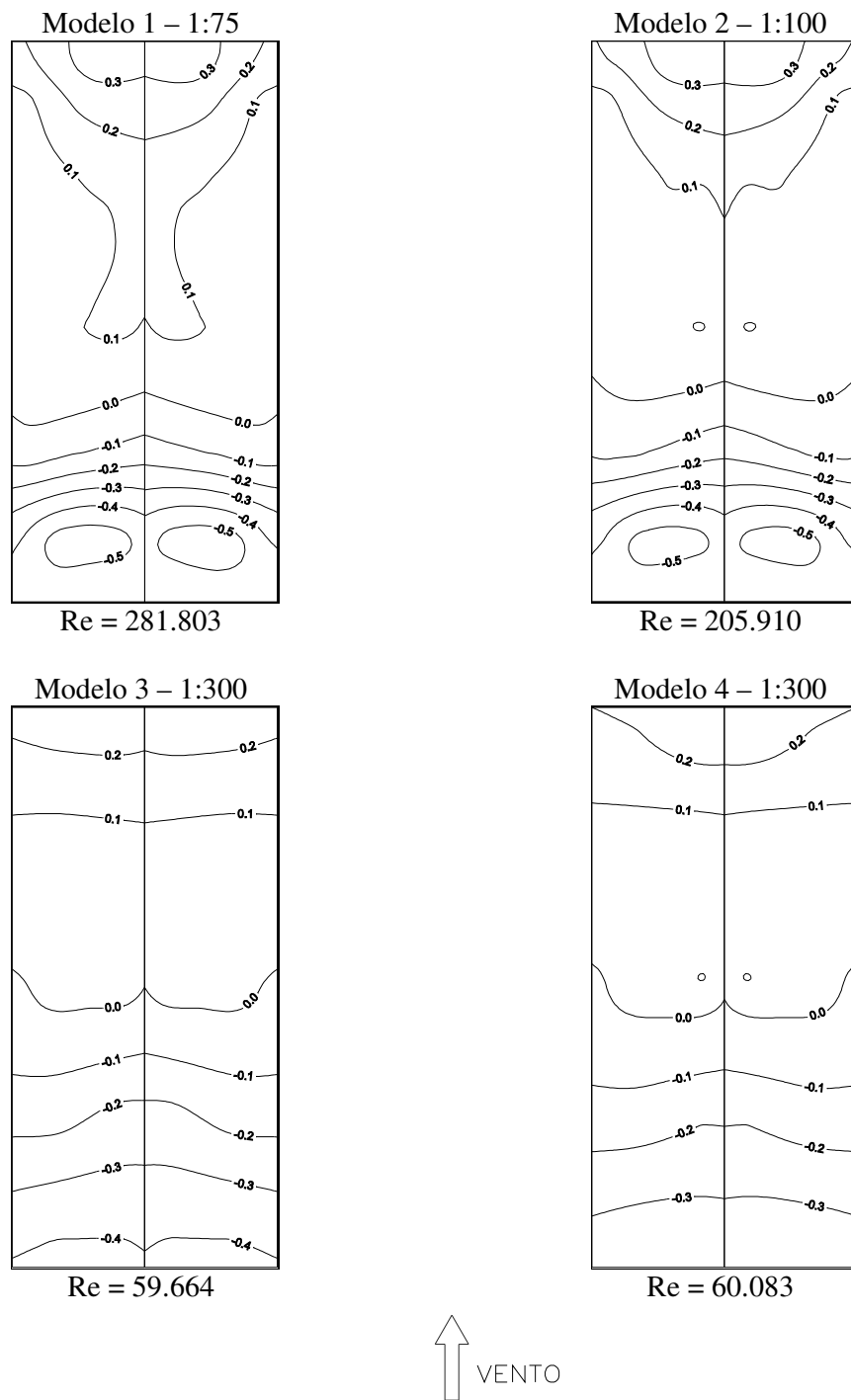


Figura 63: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,11$  com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4



Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,11$  – ângulo de incidência  $45^\circ$

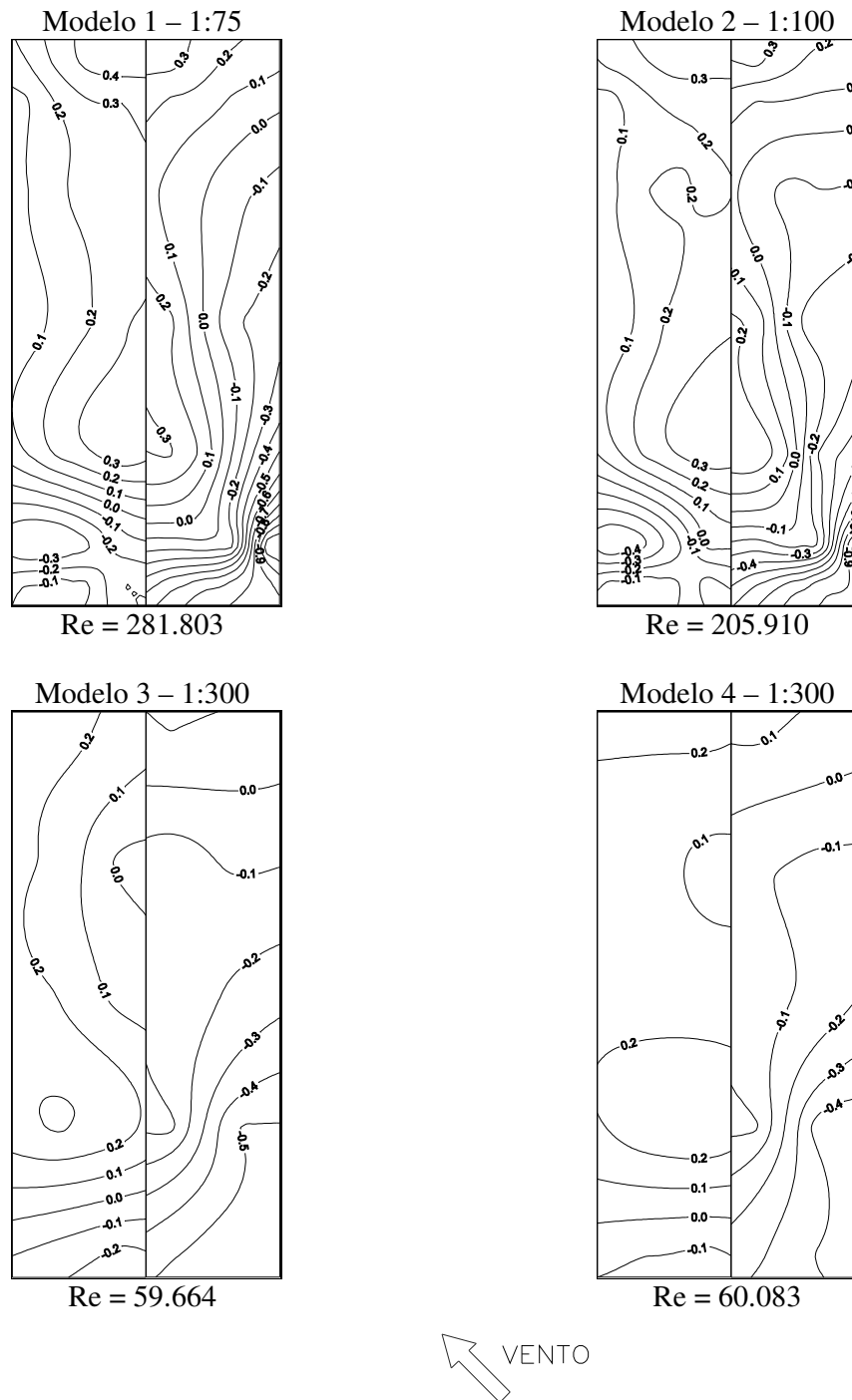


Figura 64: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,11$  com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,11$  – ângulo de incidência  $90^\circ$

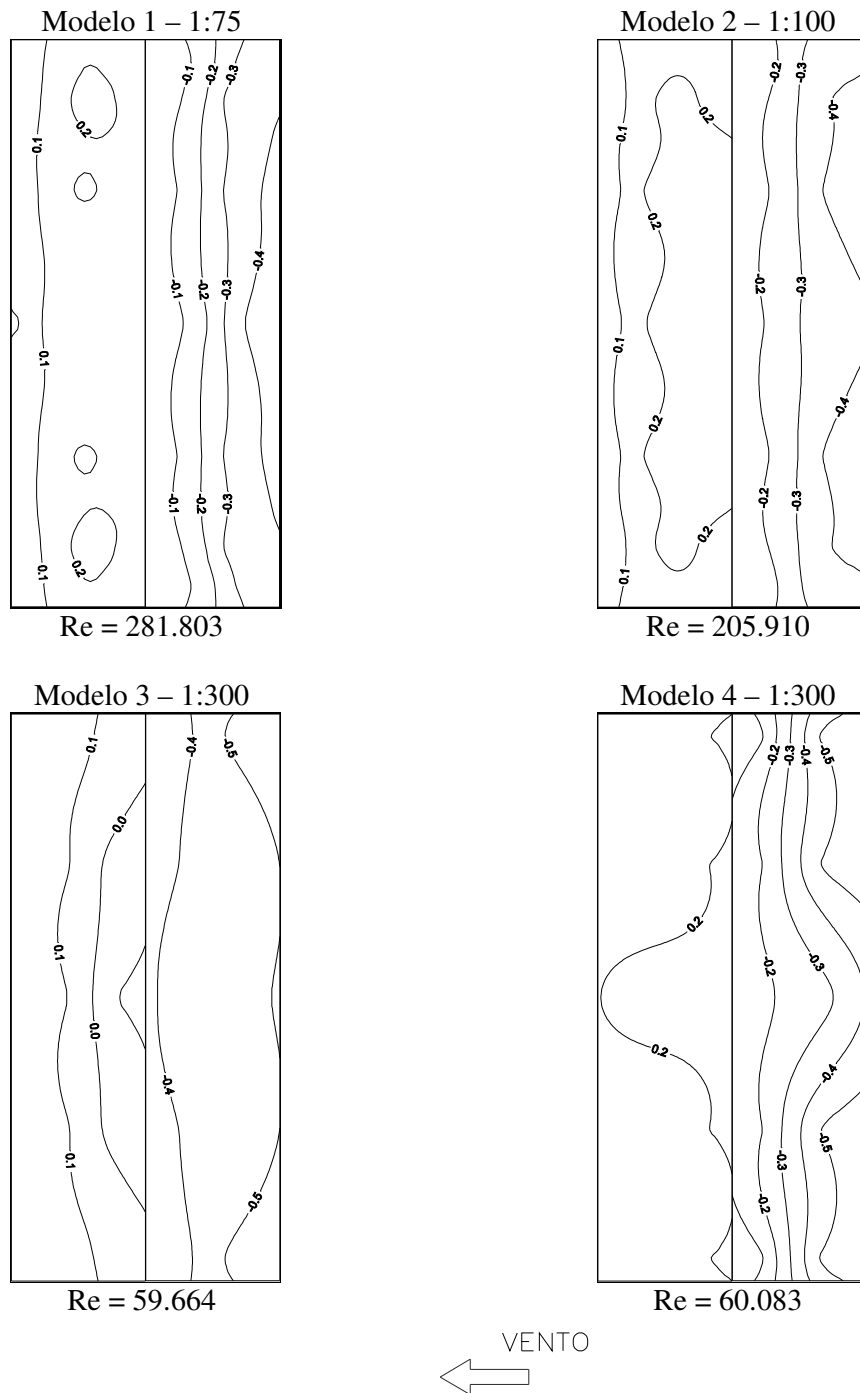


Figura 65: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,11$  com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  – ângulo de incidência  $0^\circ$

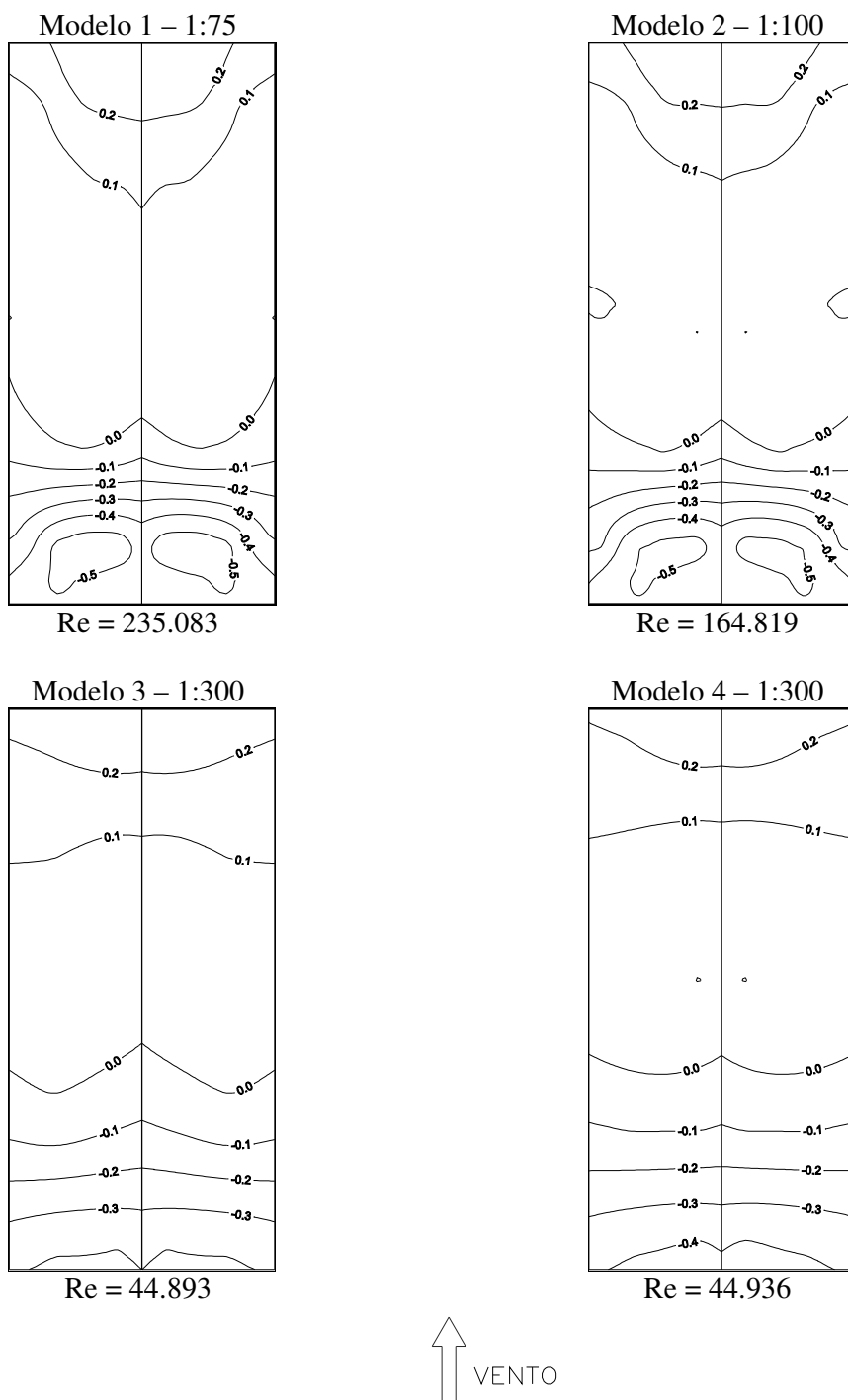


Figura 66: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  – ângulo de incidência  $45^\circ$

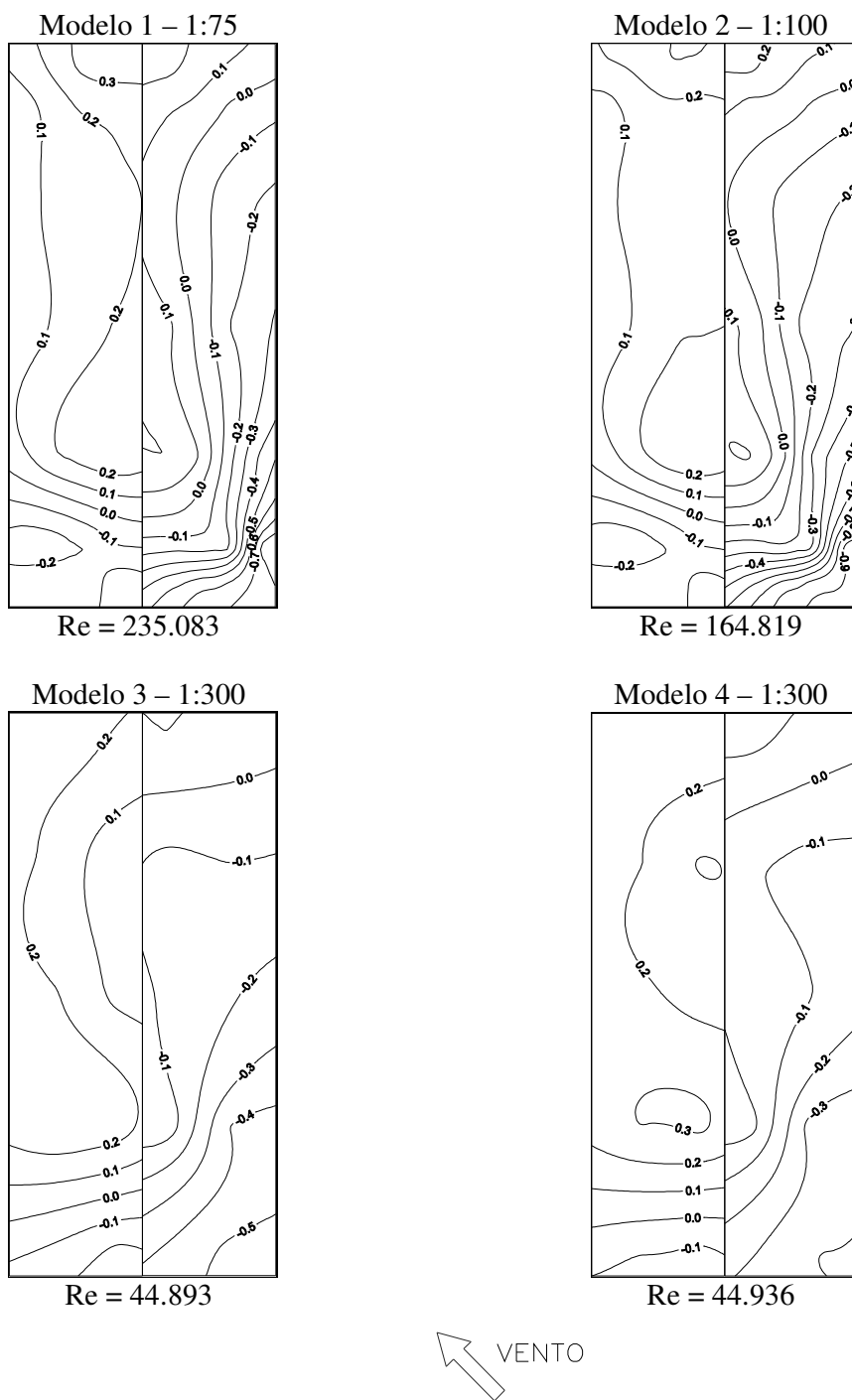


Figura 67: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

Escoamento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  – ângulo de incidência  $90^\circ$

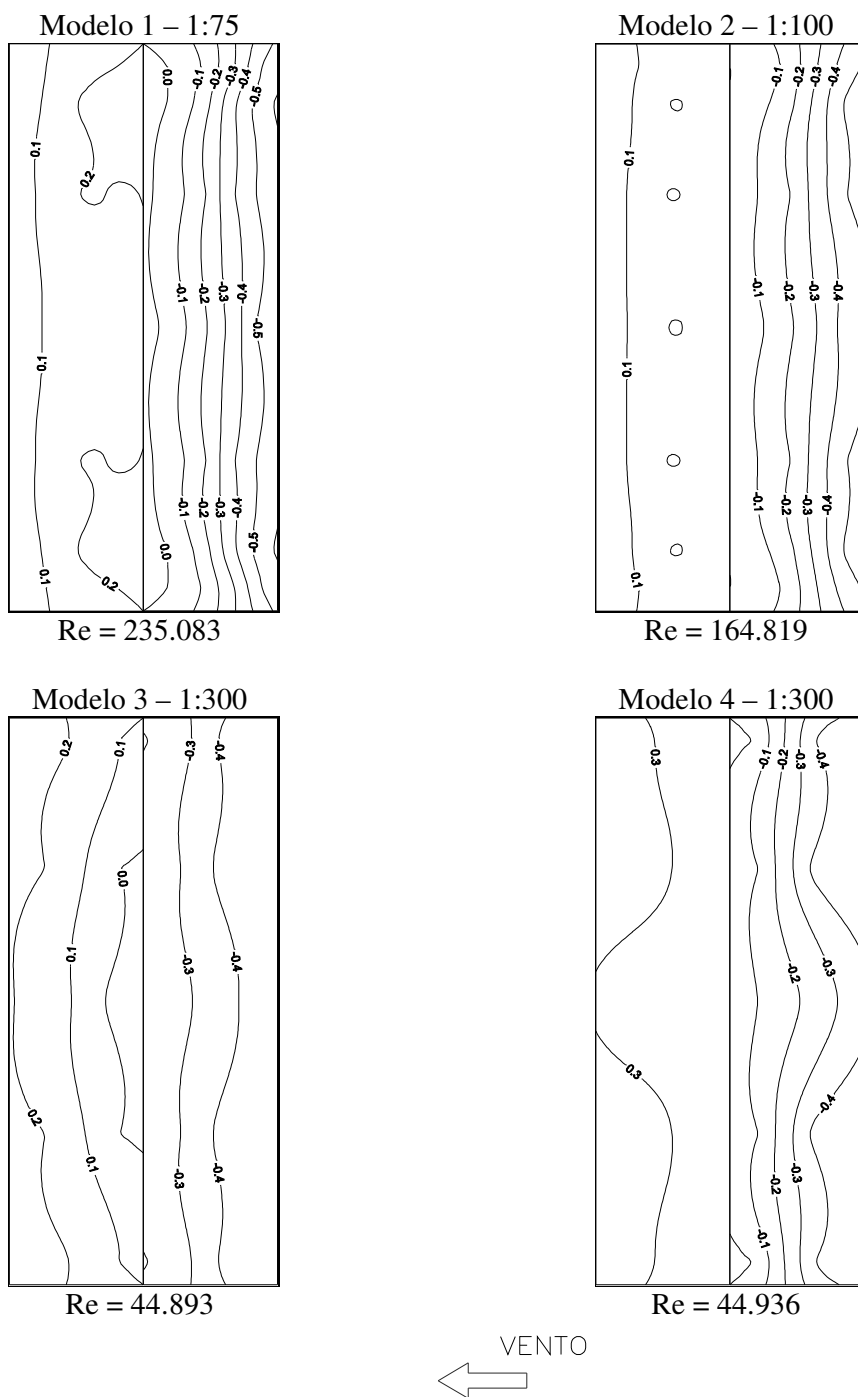


Figura 68: coeficientes de pressão interna para escoamento deslizando e turbulento  $p = 0,23$  com ângulo de incidência de  $90^\circ$ , modelos 1, 2, 3 e 4

## **Anexo 2 – Detalhes dos Modelos em Fotografias**

A seguir, detalhes dos modelos ensaiados em túnel de vento são mostrados em fotografias.



Figura 69: modelo 1 (escala 1:75), com tomadas de pressão externa, com simulador do escoamento deslizante e turbulento com  $p = 0,23$

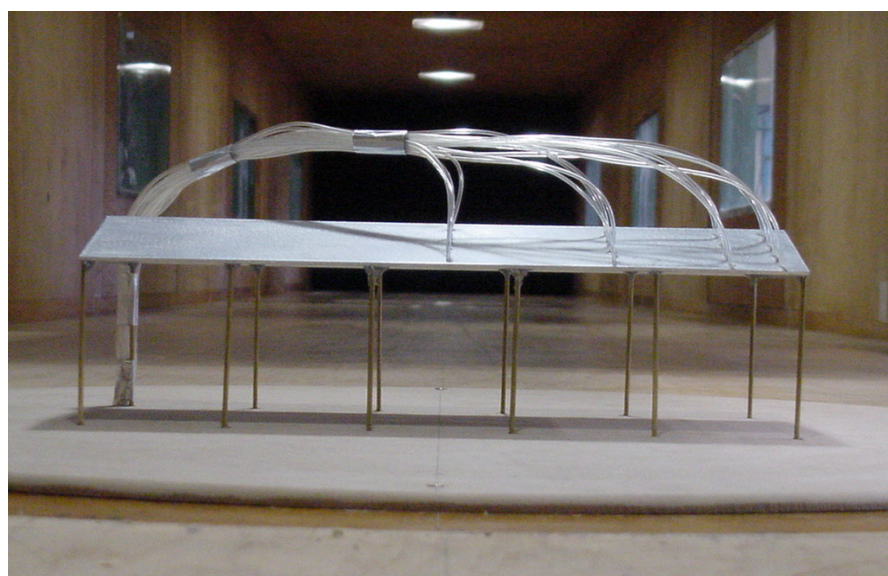


Figura 70: modelo 1 (escala 1:75), com tomadas de pressão interna

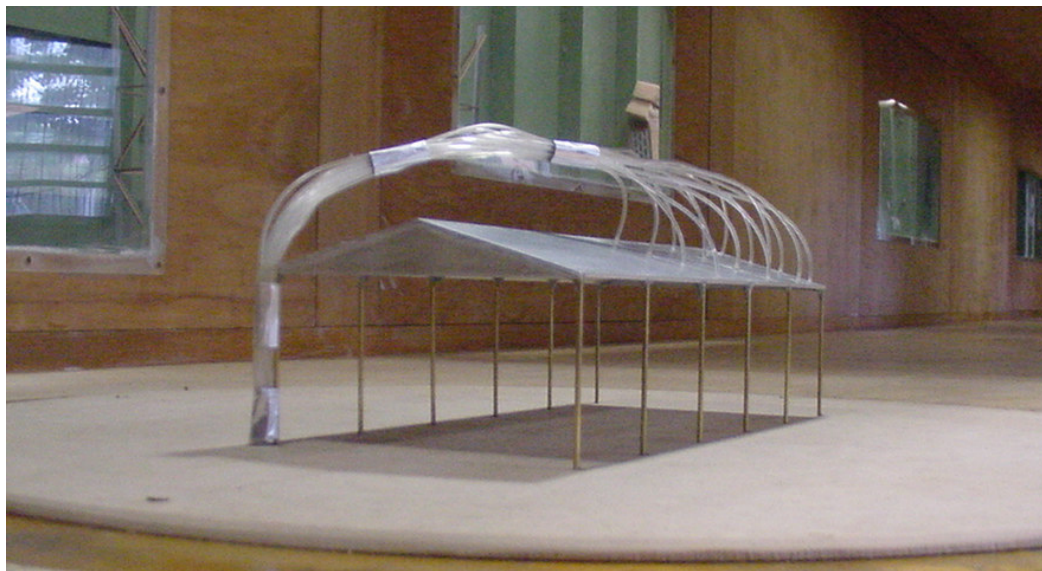


Figura 71: modelo 1 (escala 1:75), com tomadas de pressão interna

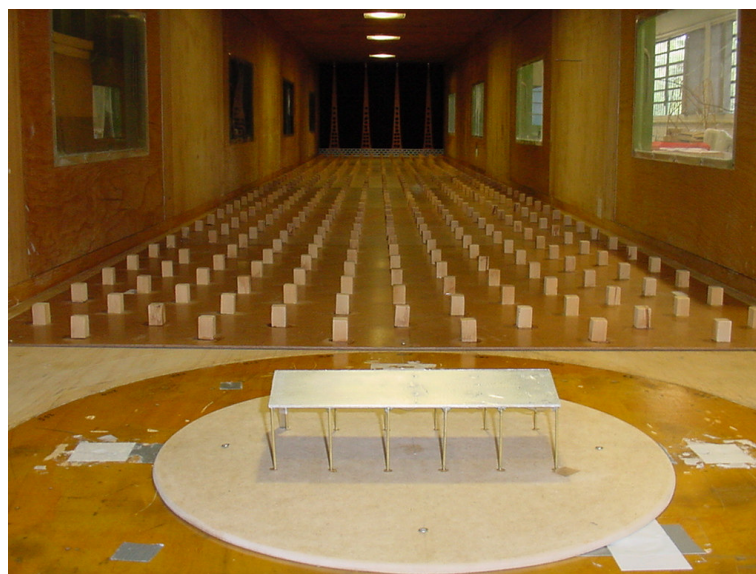


Figura 72: modelo 2 (escala 1:100), com tomadas de pressão externa



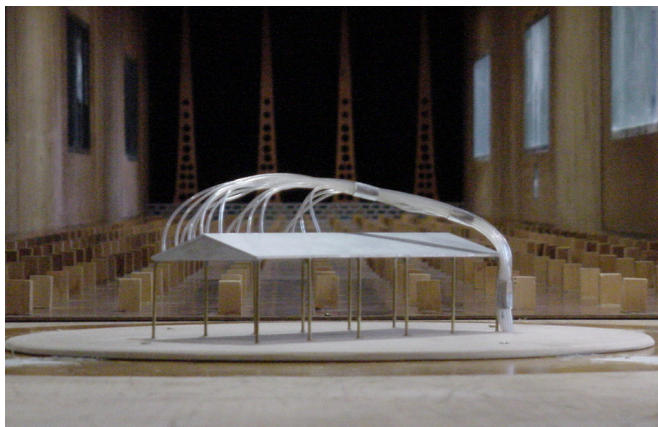


Figura 73: modelo 2 (escala 1:100), com tomadas de pressão interna

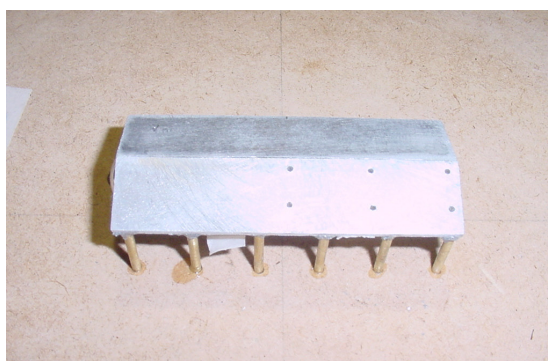


Figura 74: modelo 3 (escala 1:300 e  $e = 2,0mm$ ), com tomadas de pressão externa



Figura 75: modelo 3 (escala 1:300 e  $e = 2,0mm$ ), com tomadas de pressão interna

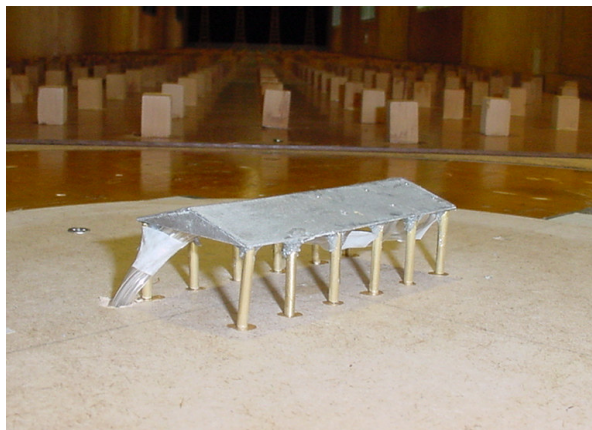


Figura 76: modelo 4 (escala 1:300 e  $e = 0,5mm$ ), com tomadas de pressão externa

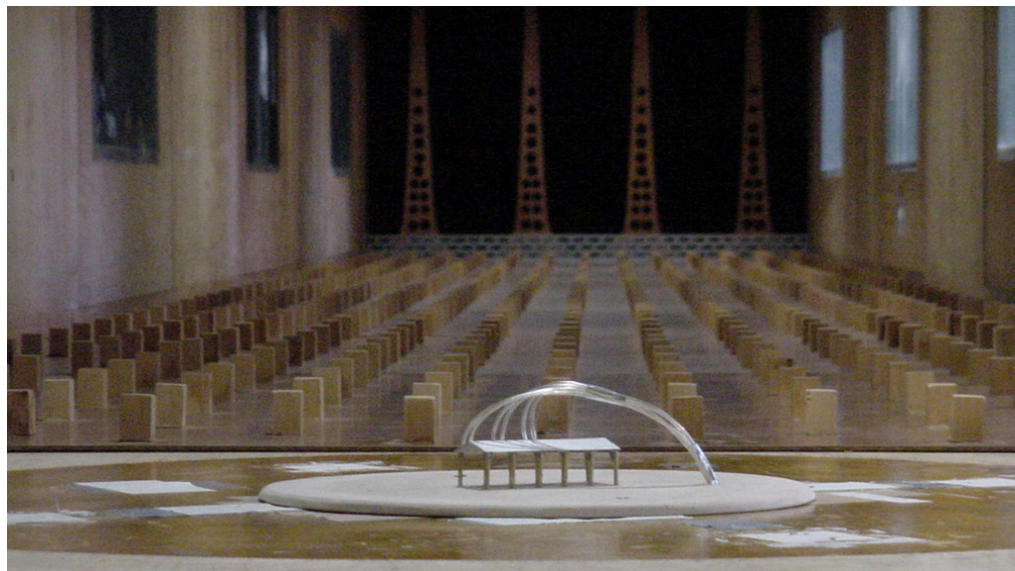


Figura 77: modelo 4 (escala 1:300 e  $e = 0,5mm$ ), com tomadas de pressão interna