



A: XXXIX-0000

## ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES DENSIDADES DE VIZINHANÇA NOS COEFICIENTES DE ARRASTO

### EXPERIMENTAL STUDY IN WIND TUNNEL OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT NEIGHBORHOOD DENSITIES ON DRAG COEFFICIENTS

P. H. Fontes-Silva (P) (1); A. M. Loredo-Souza (2); M. M. Rocha (3)

(1) Eng. Civil, MSc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil.

(2) (3) Dr. Prof., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil.

Endereço para correspondência: engpedro.fontes@gmail.com; acir@ufrgs.br; marcelo.maiarocho@gmail.com

**Área temática:** Métodos Experimentais.

#### Resumo

Diferentes densidades de vizinhança alteram o comportamento do escoamento do vento e refletem em efeitos de interferência que afetam positivamente ou negativamente as edificações, devido à complexidade da sua natureza, composta por variáveis como o tamanho e formato das edificações, suas posições de interferência, tipos de escoamento e direções de incidência do vento. A maioria das edificações se enquadram em vento de baixa turbulência, no entanto, segundo a NBR6123:1988, para uma edificação ser considerada em vento de alta turbulência deve-se atender às prescrições do item 6.5.3 que considera extensas distâncias mínimas, não se referindo à densidade dessa vizinhança. Essa pesquisa consiste na realização de uma caracterização aerodinâmica no modelo do edifício CAARC, através de um extenso estudo desenvolvido no Túnel de Vento Prof<sup>o</sup>. Joaquim Blessmann do LAC/UFRGS. Simulando distintas densidades de vizinhança através de três configurações, denominadas Configuração I (um modelo interferente), Configuração II (dois modelos) e Configuração III (três modelos), com diferentes posições relativas entre os modelos, D, 2D, 4D e 8D, onde D é a menor dimensão do modelo aerodinâmico. Visando compreender a relação de interação entre tais parâmetros na caracterização dos efeitos de interferência da vizinhança e na determinação dos coeficientes de arrasto. Com base nos resultados, tanto a quantidade de edifícios interferentes quanto o espaçamento influenciaram na determinação dos coeficientes, possibilitando obter conclusões primárias com relação às extensas distâncias do item 6.5.3 da norma.

*Palavras-chave:* aerodinâmica; coeficiente de força e arrasto; edifícios altos; efeitos de vizinhança.

#### Abstract

Different neighborhood densities change the behavior of wind flow and reflect on interference effects that affect positively or negatively the buildings, due to the complexity of their nature, composed of variables such as the size and shape of the buildings, their interference positions, types of flow and wind incidence directions. Most buildings fall into low turbulence wind, however, according to NBR6123:1988, for a building to be considered in high turbulence wind, the requirements of item 6.5.3 must be met, which considers extensive minimum distances, not referring to the density of that neighborhood. This research consists in carrying out an aerodynamic characterization in the CAARC building model, through an extensive study developed in the Wind Tunnel Prof<sup>o</sup> Joaquim Blessmann from LAC/UFRGS. Simulating different neighborhood densities through three configurations, called Configuration I (one interfering model), Configuration II (two models) and Configuration III (three models), with different relative positions between the models, D, 2D, 4D and 8D, where D is the smallest dimension of the aerodynamic model. Aiming to understand the interaction relationship between such parameters in the characterization of the interference effects of the neighborhood and in the determination of the drag coefficients. Based on the results, both the number of interfering buildings and the spacing influenced the determination of the coefficients, making it possible to obtain primary conclusions regarding the extensive distances of item 6.5.3 of the standard.

*Keywords:* aerodynamics; force and drag coefficient; tall buildings; neighborhood effects



## 1. INTRODUÇÃO

O cálculo das forças devidas ao vento através da NBR6123:1988, considera que a força exercida pelo vento está vinculada a uma pressão dinâmica, a uma área de referência e a um coeficiente aerodinâmico de força ou de pressão, sendo os coeficientes disponibilizados na norma denominados coeficientes de arrasto. Tais coeficientes são determinados para escoamentos de baixa ou alta turbulência, ficando a cargo do calculista a utilização do coeficiente correto conforme as características da edificação e seu entorno.

De acordo com a NBR6123:1988, a maioria das edificações se enquadram em vento de baixa turbulência, sendo que para uma edificação ser considerada em vento de alta turbulência deve-se atender as prescrições do item 6.5.3 da norma, que estabelece uma relação da altura ( $h$ ) da edificação em estudo com a média das alturas ( $h_{média}$ ) das edificações presentes na vizinhança e que se estendem, na direção e sentido do vento incidente, em determinadas distâncias mínimas ( $D_{mín}$ ) dessa edificação, conforme representado na Fig. 1.

*“6.5.3 Uma edificação pode ser considerada em vento de alta turbulência quando sua altura não excede duas vezes a altura média das edificações nas vizinhanças, estendendo-se estas, na direção e no sentido do vento incidente, a uma distância mínima de: 500 m, para uma edificação de até 40 m de altura; 1000 m, para uma edificação de até 55 m de altura; 2000 m, para uma edificação de até 70m de altura; 3000 m, para uma edificação de até 80 m de altura.”*

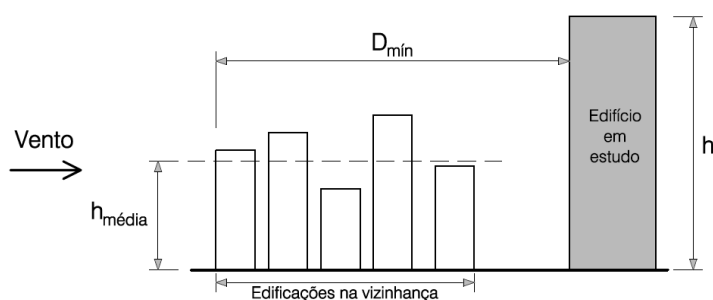


Figura 1. Configuração de escoamento de alta turbulência  
Fonte: elaborado pelo autor

No entanto, essas informações presentes no tópico 6.5 – Reduções nos coeficientes de forma e de arrasto, item 6.5.3 da NBR6123:1988, não se referem à densidade dessa vizinhança e das edificações situadas a barlavento da edificação em estudo. Considerando ainda, essas extensas distâncias indicadas nesse item para o enquadramento em um escoamento de alta turbulência, visto que diferentes densidades de vizinhança podem interferir diretamente na organização dos vórtices desprendidos das edificações. A determinação do coeficiente correto é um ponto importante, sendo motivo de dúvida e discussão entre os projetistas, considerando-se a diferença entre os valores dos coeficientes de arrasto para escoamentos do vento em baixa ou alta turbulência.

Devido à importância desse coeficiente na determinação das forças devidas ao vento através da norma, tem-se a relevância de uma análise da relação entre diferentes densidades de vizinhança interferindo na determinação desses parâmetros. Essa pesquisa consiste em um extenso estudo desenvolvido no LAC/UFRGS, realizado com a inserção de distintas densidades de vizinhança a barlavento desse modelo aerodinâmico, com diferentes posições relativas entre os modelos, visando compreender de que forma as forças devidas a ação do vento são influenciadas pelas características das edificações e de diferentes densidades de vizinhança, analisando a relação de interação entre tais parâmetros na caracterização dos efeitos de interferência da vizinhança.



## 2. METODOLOGIA: PROGRAMA EXPERIMENTAL

Considerando a influência de diferentes configurações de vizinhança na caracterização dos efeitos de interferência, esse estudo foi desenvolvido através do seguinte enfoque: analisar a variação dos coeficientes de força e de arrasto, atentando para as preconizações da NBR6123:1988. Para a caracterização aerodinâmica realizou-se ensaios no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, utilizando um modelo em escala reduzida, considerando o modelo em situação isolada e com distintas densidades de vizinhança.

Para o estudo, utilizou-se o modelo aerodinâmico reduzido do *CAARC Standard Tall Building* (Fig. 2), sendo adotado o modelo rígido devido a suas características e ao tipo de aquisição de dados necessária, confeccionado em acrílico e instrumentado com tomadas de pressão que realizam medidas instantâneas de pressões devidas a ação do vento, adequadamente distribuídas pelas faces externas do modelo. Os modelos mudos, não instrumentados, são elaborados em chapas de madeira compensada, servindo apenas como barreira de interferência à passagem do escoamento, conforme cada densidade de vizinhança.



Figura 2. Modelo reduzido do CAARC e representação de uma configuração no interior do túnel de vento  
Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 1 apresenta as características e informações dos ensaios, como o expoente  $p$  da lei potencial do perfil de velocidades médias do vento, simulado para caracterizar o escoamento do vento, a classe e categoria segundo a NBR6123:1988, o coeficiente  $k_o$ , fator de calibração do túnel de vento, a velocidade básica do vento ( $V_0$ ) e a pressão dinâmica de projeto ( $q_k$ ), entre outros.

Tabela 1. Características e informações necessárias

$p$	Classe	Categoria	$k_o$	$V_0$ (m/s)	$S_2$	$V_k$ (m/s)	$q_k$ (N/m <sup>2</sup> )
0,23	C	III e IV	1,185	42,0	1,209	50,78	1580,65

Fonte: elaborado pelo autor

Considerando o propósito desse trabalho tem-se o emprego de diferentes densidades de vizinhança, representadas através de 3 (três) configurações de ensaio, com 4 (quatro) posições relativas entre os modelos para cada configuração, totalizando 12 (doze) configurações de vizinhança. As posições relativas entre os modelos foram denominadas com o parâmetro  $D$ , que é a dimensão do menor lado da seção transversal do CAARC,  $D = 75,00$  mm.

As configurações são compostas pelo modelo instrumentado (CAARC) e pelos modelos mudos, com as 4 (quatro) posições relativas entre os modelos,  $D = 75,00$  mm,  $2D = 150,00$  mm,  $4D = 300,00$  mm e  $8D = 600,00$  mm, alinhados ao longo do eixo  $y$  a barlavento do modelo principal, na direção de incidência do vento a  $90^\circ$ . Na Fig. 3, a representação das configurações, através das perspectivas dos modelos e a referência dos ângulos de incidência do vento.



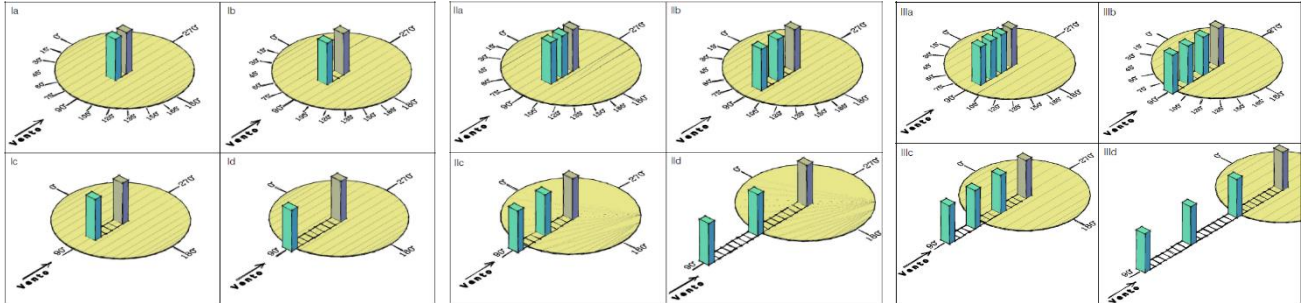


Figura 3. Perspectivas dos ensaios nas Configuração I, II e III, respectivamente  
 Fonte: elaborado pelo autor

### 3. RESULTADOS

Realizou-se o cálculo dos coeficientes de pressão média ( $\bar{c}_p$ ) através da integração dos registros das séries temporais das pressões para cada configuração ensaiada no túnel. Em seguida, foram encontrados os esforços cortantes na base do edifício para cada configuração, determinado através do somatório das forças em x e y de cada tomada instalada na superfície do modelo, considerando os senos e cossenos diretores dos vetores normais junto às tomadas de pressão. Por fim, para cada ângulo de incidência calculou-se os coeficientes de força em termos das respostas transversais e longitudinais médias, conforme as configurações de ensaio, isolado ( $C_{x,iso}$  e  $C_{y,iso}$ ) e com vizinhança ( $C_{x,cv}$  e  $C_{y,cv}$ ), determinados a partir dos esforços cortantes totais na base.

Assim, foram encontrados os coeficientes de arrasto ( $C_a$ ) para cada configuração de ensaio, determinados através do valor do coeficiente de força na direção longitudinal do escoamento, que é a componente da força global na direção do vento ( $C_y$ ) nesse estudo. Esses coeficientes foram selecionados apenas para a incidência do vento a  $90^\circ$  em todas as configurações. Com isso, tem-se a relação de interação entre os parâmetros adotados na caracterização dos efeitos de interferência e na análise da variação do coeficiente de arrasto, com os modelos interferentes sendo posicionados ao longo do túnel a barlavento do modelo aerodinâmico.

Na Fig. 4, tem-se os resultados obtidos para a configuração isolada, apresentando a variação dos coeficientes de força ( $C_x$  e  $C_y$ ) em função do ângulo de incidência do vento, com a medição das pressões realizada de 0 a  $345^\circ$ . Esses resultados serão utilizados em todo o estudo, possibilitando a análise da influência da vizinhança no modelo aerodinâmico.

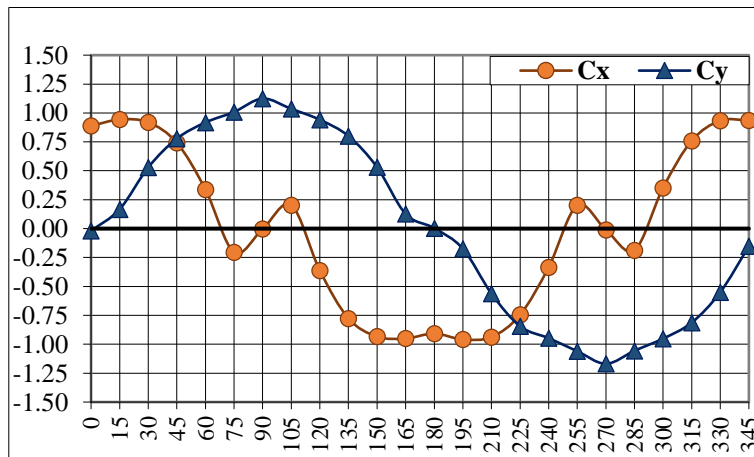


Figura 4. Coeficientes de força ( $C_x$  e  $C_y$ ) na Configuração Isolado  
 Fonte: elaborado pelo autor



Na Fig. 5, a representação de todas as posições relativas na Configuração I, inseridas no interior do túnel de vento. Na Fig. 6, tem-se os resultados obtidos para a Configuração I, configurações Ia, Ib, Ic e Id, apresentando a variação dos coeficientes de força ( $C_x$  e  $C_y$ ) em função do ângulo de incidência do vento. Nas configurações Ia e Ib, as medições das pressões foram realizadas de 0 a 270°, nas demais, Ic e Id, apenas com vento incidindo perpendicularmente a maior fachada do CAARC na direção de incidência do vento a 90°, conforme apresentado.

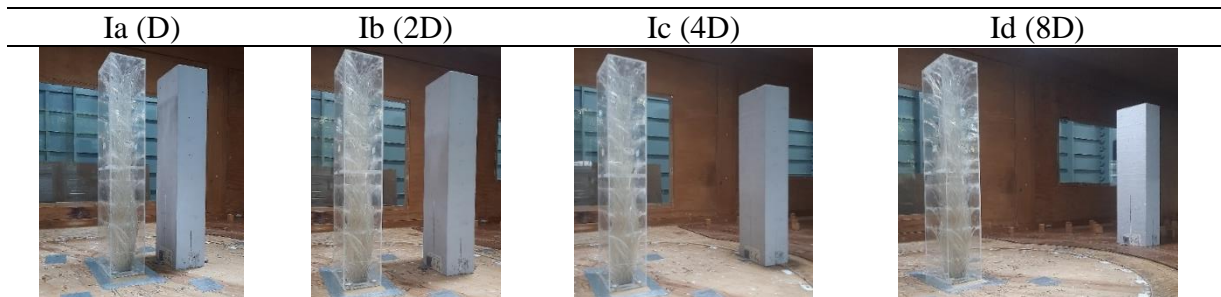


Figura 5. Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração I)  
Fonte: elaborado pelo autor

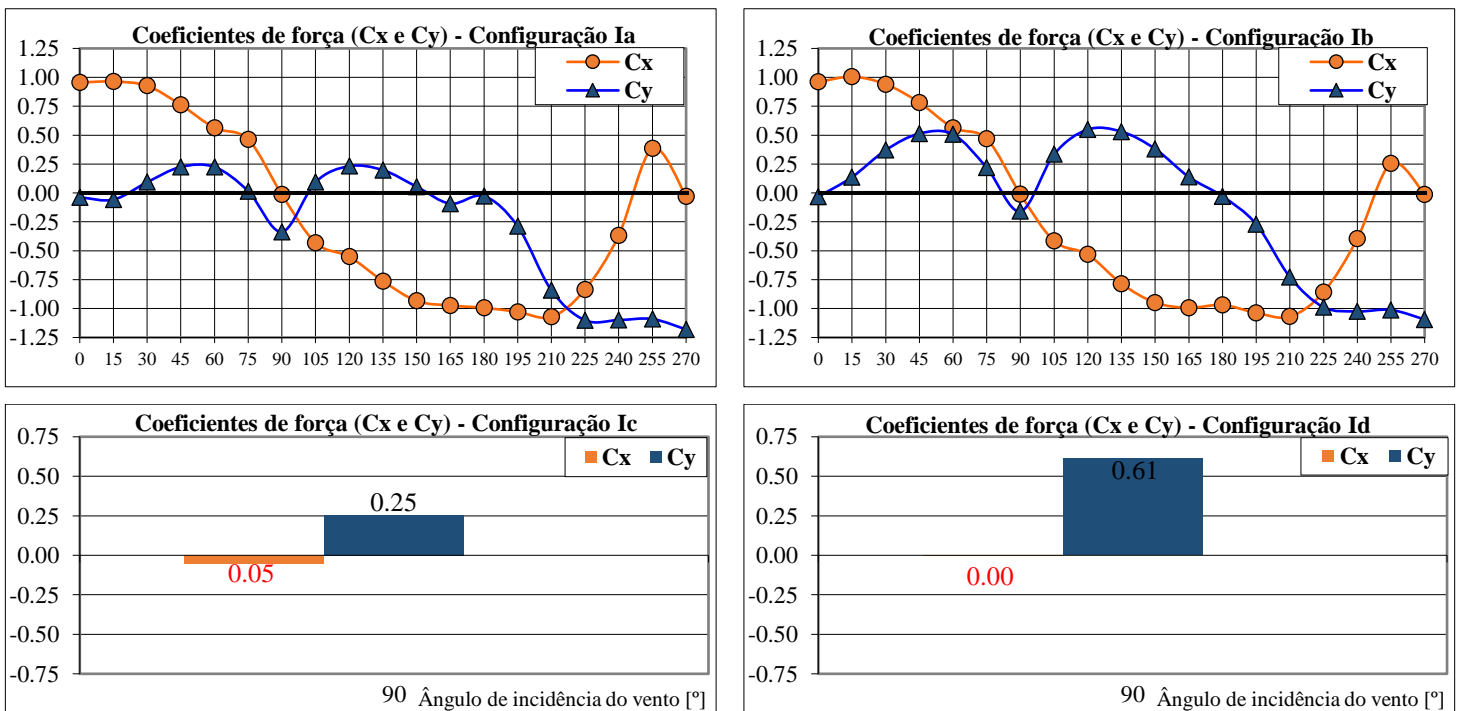


Figura 6. Coeficientes de força ( $C_x$  e  $C_y$ ) na Configuração I  
Fonte: elaborado pelo autor

Observando os gráficos da Fig. 6, considerando as definições presentes na literatura para determinação dos coeficientes de arrasto ( $C_a$ ), tem-se a Tabela 2, compreendendo a seleção dos coeficientes para cada configuração indicada na Configuração I. Inicialmente, é possível observar a expressiva redução e inversão nos valores dos coeficientes, causando um efeito de proteção: o  $C_a$  para o modelo isolado passa de 1,12 para -0,34 com a adição de uma edificação interferente com espaçamento  $D = 75,00$  mm. Em seguida, observa-se que conforme a única edificação interferente, posicionada a barlavento, é afastada da edificação em estudo ao longo do eixo do



túnel, ocorre o aumento dos coeficientes, possivelmente relacionado com a formação mais definida da esteira com vórtices mais organizados e maior energia, resultando no aumento gradativo dos coeficientes e na majoração das ações do vento, trafegando entre os regimes de escoamento do efeito de interferência denominado turbulência da esteira.

Tabela 2. Resultados do Ca (Configuração I)

Configuração	Isolado	Ia (D)	Ib (2D)	Ic (4D)	Id (8D)
Ca	1,12	-0,34	-0,16	0,25	0,61

Fonte: elaborado pelo autor

Na Fig. 7, a representação de todas as posições relativas na Configuração II. Seguindo o procedimento de análise da Configuração I, observa-se que conforme as duas edificações interferentes são afastadas da edificação em estudo ao longo do eixo do túnel, na Configuração II (Tabela 3), ocorre o aumento dos coeficientes como na configuração anterior. Provavelmente relacionado com a formação mais definida da esteira, com vórtices mais organizados e maior energia, resultando no aumento gradativo dos coeficientes e na majoração das ações do vento, o que caracteriza os regimes de escoamento do efeito de interferência denominado turbulência da esteira. No entanto, observa-se uma menor intensidade dos efeitos nessa configuração mais afastada, devido ao aumento do número de edificações interferentes.

Tabela 3. Resultados do Ca (Configuração II)

Configuração	Isolado	IIa (D)	IIb (2D)	IIc (4D)	IIId (8D)
Ca	1,12	0,11	0,28	0,47	0,55

Fonte: elaborado pelo autor

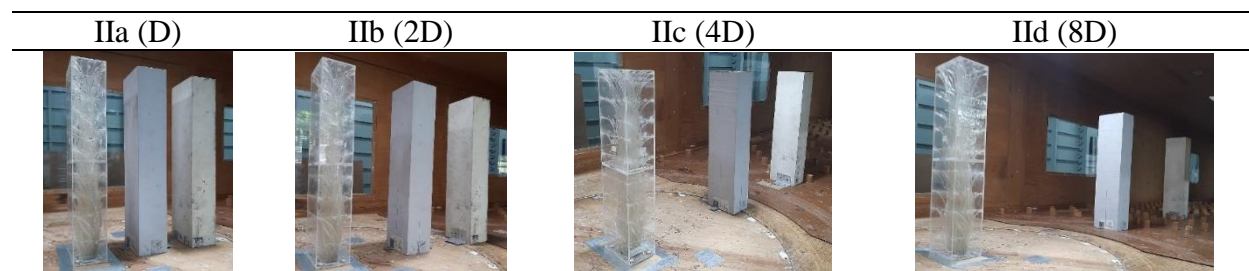


Figura 7. Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração II)

Fonte: elaborado pelo autor

Na Fig. 8, a representação de todas as posições relativas na Configuração III. Conforme os resultados presentes na Tabela 4, observa-se que à medida que as três edificações interferentes são afastadas da edificação em estudo ao longo do túnel, ocorre o aumento dos coeficientes, conforme ocorreu nas configurações anteriores. No entanto, novamente observa-se uma menor intensidade nas ações, comparada aos resultados com os afastamentos na Configuração II. Relacionado ao aumento do afastamento entre as edificações interferentes e ao maior número de edificações no entorno na Configuração III.

Tabela 4. Resultados do Ca (Configuração III)

Configuração	Isolado	IIIa (D)	IIIb (2D)	IIIc (4D)	IIId (8D)
Ca	1,12	0,16	0,29	0,39	0,52

Fonte: elaborado pelo autor



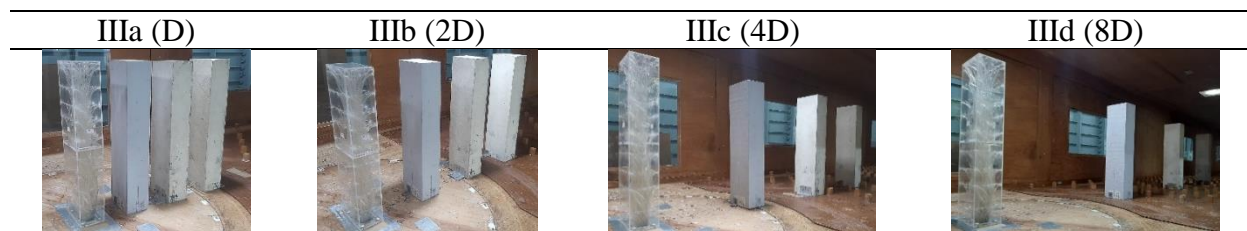


Figura 8. Modelos posicionados no interior do túnel de vento (Configuração III)

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados referentes aos ensaios realizados nesse estudo no LAC/UFRGS, relacionados aos coeficientes de arrasto captados com vento incidindo apenas perpendicularmente a maior fachada do modelo (vento a  $90^\circ$ ), apresentou dados da relação de interação dos parâmetros adotados nesses ensaios e a variação do coeficiente de arrasto com os modelos interferentes sendo posicionados ao longo do túnel, em cada configuração. Na Tabela 5, a junção dos resultados das Configurações I, II e III com seus respectivos espaçamentos a (D), b (2D), c (4D) e d (8D).

Tabela 5. Resultado dos coeficientes de arrasto ( $C_a$ ), configurações I, II e III

Configuração	Isolado	a (D)	b (2D)	c (4D)	d (8D)
I		-0,34	-0,16	0,25	0,61
II	1,12	0,11	0,28	0,47	0,55
III		0,16	0,29	0,39	0,52

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de arrasto determinados para todas as configurações indicadas nesse estudo. Através desses resultados tem-se algumas considerações:

- Observou-se uma expressiva redução nos valores dos coeficientes com vizinhança em relação ao coeficiente para a edificação isolada, indicando um efeito de proteção;
- No entanto, observou-se também que em todas as configurações com essa vizinhança posicionada a barlavento houve um aumento gradativo dos coeficientes à medida em que se aumentava o espaçamento entre os modelos interferentes, em D, 2D, 4D e 8D, como observa-se analisando os resultados na horizontal. Este fato está relacionado com a formação mais definida da esteira, com vórtices mais organizados e maior energia, resultando no aumento sucessivo desses coeficientes. Nesse ponto, identificam-se os regimes de escoamento do efeito de interferência denominado turbulência da esteira, iniciando no regime de escoamento deslizante, passando pelo regime de escoamento de interferência de esteira, até chegar no regime de escoamento de corpo isolado;
- Em contrapartida, também é possível observar que em conjunto com o aumento do espaçamento, quando se aumentava o número de edificações interferentes em cada configuração, Configuração I (uma edificação), Configuração II (duas edificações) e Configuração III (três edificações), o aumento dos coeficientes ocorria em menores proporções, como observa-se analisando os resultados na vertical. Esse aumento é observado até o afastamento 2D, a partir do qual tem-se uma inversão e são encontrados coeficientes menores, conforme o aumento do número de edificações em conjunto com o espaçamento. Este é observado entre as Configurações II e III com espaçamento 4D e, também, nas Configurações I, II e III com espaçamento 8D;



- Portanto, pode-se concluir com base apenas nesses ensaios iniciais, necessitando de mais estudos relacionados, que tanto a quantidade de edifícios interferentes quanto o espaçamento influenciam na determinação dos coeficientes de arrasto. A Fig. 9 apresenta a evolução dos coeficientes de acordo com as configurações e espaçamentos. Destacam-se as configurações II e III, apresentando comportamentos bastante similares em todos os espaçamentos e, ainda, a tendência, a partir do espaçamento 4D entre os modelos, de constância e estagnação dos resultados nas configurações seguintes;
- Com base nesses resultados, acredita-se que para as simulações em túnel de vento, considerando a presença de edificações na vizinhança, devem ser considerados modelos interferentes situados até a Configuração Id (8D), raio de aproximadamente 600 mm, seguindo a tendência de estagnação dos resultados nessa região, mesmo com a adição de outros modelos interferentes, como nas Configurações IId e IIId.

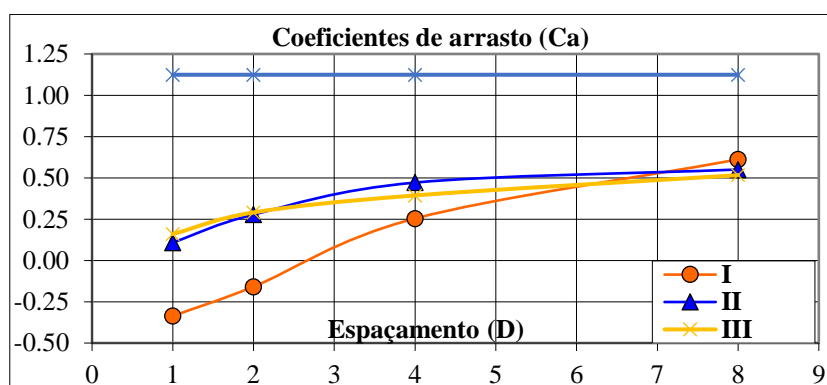


Figura 9. Coeficiente de arrasto ( $C_a$ ) em todas as configurações  
Fonte: elaborado pelo autor

Com relação às distâncias mínimas preconizadas no item 6.5.3 da NBR6123:1988, que prevê as condições exigíveis para que uma edificação seja considerada imersa em um escoamento de alta turbulência, através das edificações presentes na vizinhança e que se estendem na direção e sentido do vento incidente, acredita-se, com base apenas nos resultados obtidos nesse estudo, que a norma seja muito cautelosa ao indicar essas extensas distâncias.

De uma forma geral, os resultados apresentados nesse estudo mostram a importância da realização de ensaios em túneis de vento em laboratórios especializados, conforme o estudo de edificações não convencionais, a complexidade da vizinhança no entorno e/ou impossibilidade de aplicação das preconizações das normas e códigos disponíveis. Ressalta-se a importância de se considerar os efeitos da ação do vento, principalmente levando em consideração os fenômenos de interferência da vizinhança causados pelas edificações no entorno.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC).

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR6123 – Forças devidas ao vento em edificações. 66p. Edição 1988. Rio de Janeiro, 1988.