

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES: EFEITO DA SOMBRA AERODINÂMICA EM GEOMETRIAS BIDIMENSIONAIS

Roberto F. Bobenrieth Miserda

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil, E-mail: roberto@enm.unb.br

Alessandra F. de M. Falcão

Juliana Maria Duarte Mol

Instituto Nacional de Meteorologia, Eixo Monumental, Via S1, 70610-400, Brasília, DF, Brasil

Resumo

O objetivo deste trabalho é a adaptação e utilização de um código numérico para realizar uma análise preliminar do carregamento aerodinâmico sobre estruturas com geometrias simples bidimensionais. Para isto, são simuladas as grandes escalas da esteira turbulenta de edificações na presença de um escoamento uniforme, i.e., sem considerar o gradiente de velocidade vertical presente na camada limite atmosférica. O código numérico que serve de base foi desenvolvido por Bobenrieth (1996) e o mesmo resolve o campo de grandes escalas de escoamentos turbulentos utilizando um modelo compressível simplificado e específico para as condições de parede adiabática e baixo número de Mach. Neste trabalho são analisadas geometrias bidimensionais com e sem sombra aerodinâmica, com ênfase no efeito de forma para geometrias sem sombra aerodinâmica e os efeitos de distância relativa para geometrias com sombra aerodinâmica.

Palavras-chaves: Turbulência, Carregamento Dinâmico, Edificação, Sombra Aerodinâmica

1. INTRODUÇÃO

A simulação numérica de fenômenos físicos não lineares e não permanentes, como é o caso do vento natural sobre edificações, é uma ferramenta poderosa de análise que permite resolver problemas de engenharia associados a estes tipos de fenômenos. O cálculo do carregamento aerodinâmico em edificações, para um determinado número finito de condições, pode ser obtido utilizando-se normas reguladoras. Estas normas são conservativas, isto é, fornecem carregamentos aerodinâmicos superiores aos reais, que oneram substancialmente o custo estrutural da edificação. Uma alternativa interessante para o cálculo do carregamento aerodinâmico é a utilização de recursos computacionais que, a um custo relativamente baixo, permitam determinar com maior precisão as forças da ação do vento natural sobre edificações. Neste caso é prioritário determinar as forças e momentos resultantes, já que estas resultantes aerodinâmicas são parâmetros fundamentais no projeto estrutural de edificações.

O objetivo deste trabalho consiste em realizar uma análise preliminar do carregamento aerodinâmico sobre estruturas com geometrias simples, concentrando a análise no efeito do parâmetro de forma, em edificações sobre as quais não existe o efeito de outra edificação,

bem como, nos efeitos da sombra aerodinâmica, isto é, os efeitos da esteira turbulenta gerada pela primeira edificação sobre a segunda. Neste último caso, o parâmetro estudado é a distância relativa entre as duas edificações.

É importante mencionar que é realizada uma análise preliminar do carregamento aerodinâmico sobre estruturas com geometrias simples, já que está fora do escopo deste trabalho a simulação computacional do vento natural, dada a complexidade teórica e prática deste tipo de simulação. Em conseqüência, a ênfase está sobre a aerodinâmica de corpos rombudos bidimensionais, onde os parâmetros de forma e distância relativa são determinantes.

2. MODELO MATEMÁTICO

Neste trabalho é utilizado o modelo proposto por Bobenrieth (1996) para simular as grandes escalas presentes em escoamentos turbulentos para baixos números de Mach. Este modelo consiste em uma formulação compressível para as equações governantes, isto é, a densidade não é constante nas equações de continuidade, Navier-Stokes e energia. Para obter-se o campo de grandes escalas, este sistema de equações governantes é filtrado utilizando-se o “filtro de caixa” clássico (Silveira Neto, 1993). Este processo matemático de filtragem tem como subprodutos tensores e vetores submalha, e neste modelo, somente são utilizados o tensor e o vetor de Reynolds, provenientes da filtragem dos termos de transporte convectivo das equações de Navier-Stokes e energia, respectivamente. Utilizando-se a notação de Einstein, as equações governantes filtradas podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \underline{u}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \underline{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \underline{u}_i \underline{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\underline{\mu} + \underline{\mu}_t) \underline{s}_{ij}], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \bar{\rho} \left[e + \left(\underline{u}_j^2 / 2 \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left[e + \left(\underline{u}_j^2 / 2 \right) \right] \underline{u}_i \right\} = \\ = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{p} \underline{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\underline{\mu} \underline{s}_{ij} \underline{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} [(\underline{k} + \underline{k}_t / \gamma) (\partial \underline{T} / \partial x_i)], \end{aligned} \quad (3)$$

onde o tensor taxa de deformações é dado por

$$\underline{s}_{ij} = \left(\frac{\partial \underline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \underline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \underline{u}_k}{\partial x_k}. \quad (4)$$

Para permitir o fechamento deste sistema, é usado o modelo de turbulência submalha de Smagorinsky (1963):

$$\underline{\mu}_t = \bar{\rho} (C_s \Delta)^2 \sqrt{\underline{s}_{ij} \underline{s}_{ij}} \quad (5)$$

3. MÉTODO NUMÉRICO

Para integrar numericamente este modelo matemático, é utilizado o método preditor-corretor de MacCormack na sua formulação de volumes finitos (Hirsch, 1990). Como trata-se de um método explícito, com um custo computacional baixo por iteração, é ideal para simular o campo de grandes escalas do escoamento turbulento nas geometrias estudadas, já que este campo é não permanente. Isto significa que é necessário realizar um número muito grande de iterações, para que as propriedades médias calculadas sejam estatisticamente representativas,

e conseqüentemente, para viabilizar este tipo de análise, é fundamental que o custo computacional de cada iteração seja baixo.

4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Primeiramente, foi feita a geração das malhas computacionais para a edificação simplificada bidimensional para os casos com e sem sombra aerodinâmica. Devido à presença do prédio, onde não há o efeito de outra edificação, fez-se necessária a criação de três malhas computacionais, correspondentes às regiões anterior, superior e posterior ao prédio. Para a situação com sombra aerodinâmica, devido à presença de dois prédios, fez-se necessária a criação de cinco malhas computacionais, correspondentes às regiões anterior, superior e posterior ao primeiro prédio e superior e posterior ao segundo prédio (figura 1).

O código computacional que serviu como base foi desenvolvido para simular o escoamento em torno de várias geometrias bidimensionais e tridimensionais. Neste trabalho, foi necessário modificar este código para simular as geometrias estudadas. O código resultante foi escrito em Fortran 90 e executado em uma estação de trabalho DEC AlphaStation 333/500 que utiliza UNIX como sistema operacional. A visualização dos resultados foi feita utilizando-se o software TECPLOT 7.0.

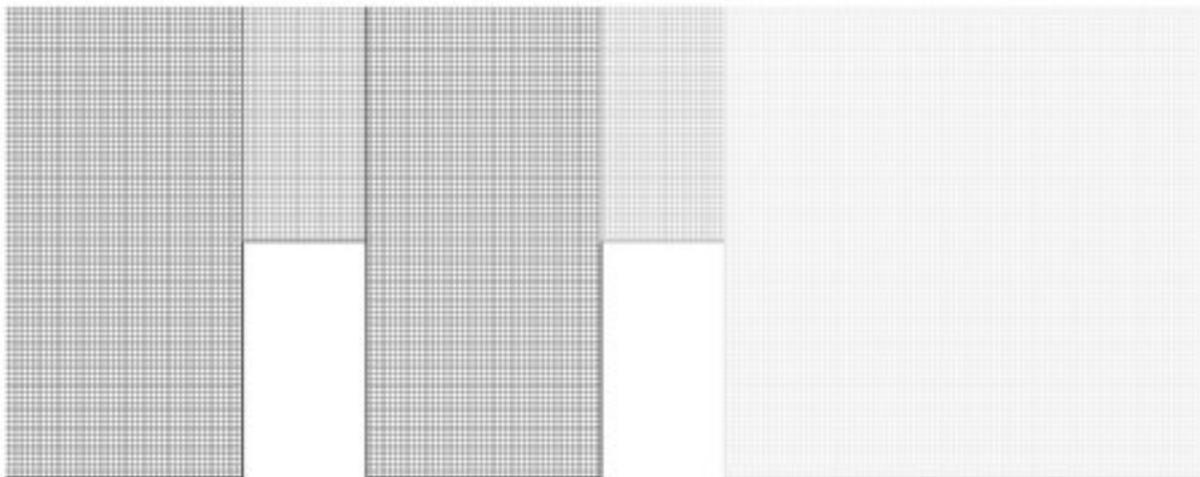


Figura 1: Malha computacional típica para um caso com sombra aerodinâmica.

5. RESULTADOS

Foram estudados quatro casos: dois sem sombra aerodinâmica e dois com sombra aerodinâmica. A velocidade do escoamento não perturbado utilizada para todos os casos foi de $U_{\infty} = 50,0$ m/s, valor máximo para a velocidade básica do vento no Brasil (NBR 6123, 1987). O número de Reynolds, calculado em todos os casos com base na altura dos prédios na direção ortogonal ao escoamento não perturbado, foi de $3,19 \times 10^8$. A malha utilizada em todos os casos é regular e possui 50 elementos ao longo da altura ($H = 100$ m) da estrutura.

Nos casos sem sombra aerodinâmica foi estabelecida uma razão de forma, definida como a razão entre a altura e a largura da geometria retangular da estrutura, medidas na direção ortogonal e paralela ao escoamento não perturbado, respectivamente. Foram estudadas duas razões de forma, com valores 2,0 (figura 2) e 0,5 (figura 4). Estas figuras apresentam o campo de vorticidade instantâneo. Em particular, na figura 2, pode-se observar o crescimento de um grande vórtice junto à estrutura, assim como a evolução de outro pelo domínio, que também foi gerado pela estrutura em um tempo anterior. Na figura 4, junto ao canto superior direito da

estrutura, pode-se observar a separação da camada limite e o enrolamento da mesma na direção horária, indicando o nascimento de um novo vórtice na presença de outro já maduro que começa a deslocar-se. Comparando-se as duas figuras, pode-se observar o efeito da redução da razão de forma sobre a topologia dos grandes vórtices, provocando a transformação das linhas de isovorticidade concêntricas em onduladas, aumentando o tamanho dos vórtices gerados e diminuindo a intensidade do campo de vorticidade.

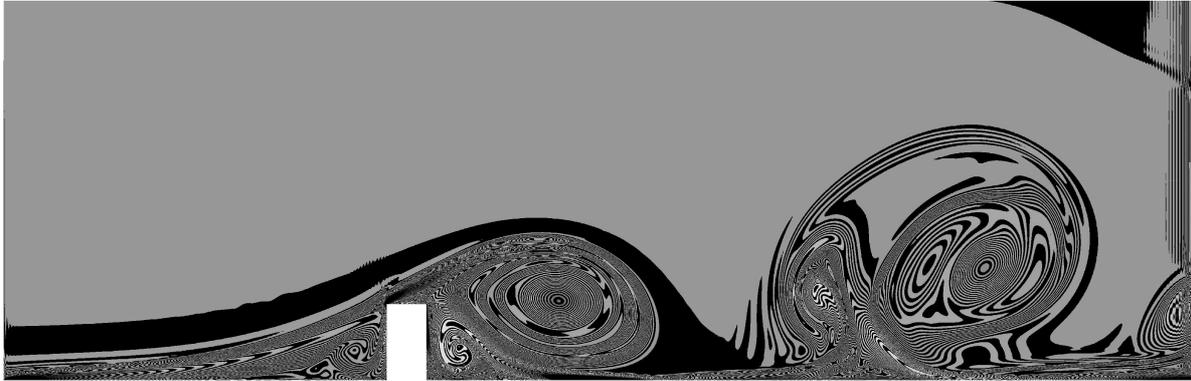


Figura 2: Campo de vorticidade adimensional para o tempo $t = 89,0 H/U_{\infty}$. Valor mínimo de -10 e máximo de 10 . Razão de forma igual a $2,0$.

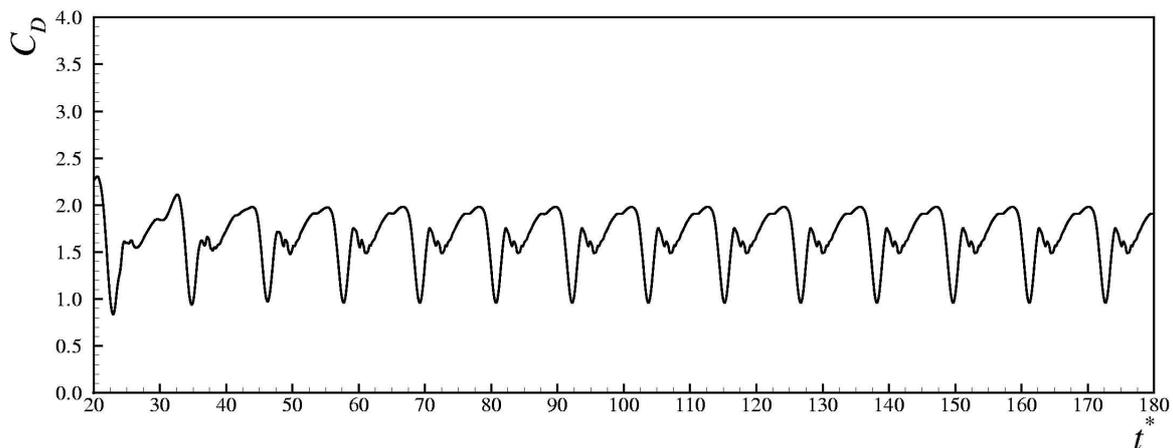


Figura 3: Distribuição temporal do coeficiente de arrasto. Razão de forma $2,0$. Coeficiente de arrasto médio de $1,79$.

Integrando-se numericamente a distribuição superficial de pressão e tensão superficial para o campo de velocidade médio, obtém-se que o coeficiente de arrasto médio é de $1,79$ para a razão de forma igual a $2,0$, e de $1,68$ para a razão de forma igual a $0,5$, correspondendo a um carregamento médio de $26,83 \text{ ton/m}$ e $25,18 \text{ ton/m}$, respectivamente. A amplitude da variação do coeficiente de arrasto instantâneo é de $1,06$ para o primeiro caso (figura 3), e de $2,28$ para o segundo (figura 5), correspondendo a uma amplitude de carregamento instantâneo de $15,89 \text{ ton/m}$ e $34,18 \text{ ton/m}$, respectivamente. Nota-se que, quanto menor a razão de forma, menores são os valores do coeficiente de arrasto médio e maiores são as amplitudes do coeficiente de arrasto. Isto ocorre pelo fato de que as estruturas vão se tornando mais complexas, e portanto, o ciclo de geração das grandes escalas e as oscilações dos valores de coeficiente de arrasto instantâneo aumentam, resultando em uma maior solicitação da edificação.

O tempo de CPU necessário para simular o primeiro caso (razão de forma igual a 2,0) foi de 97,5 horas e para o segundo (razão de forma igual a 0,5) foi de 105,0 horas. Uma análise das figuras 3 e 5, permite verificar que o tempo total de simulação é suficiente para estabelecer estatisticamente as médias temporais.

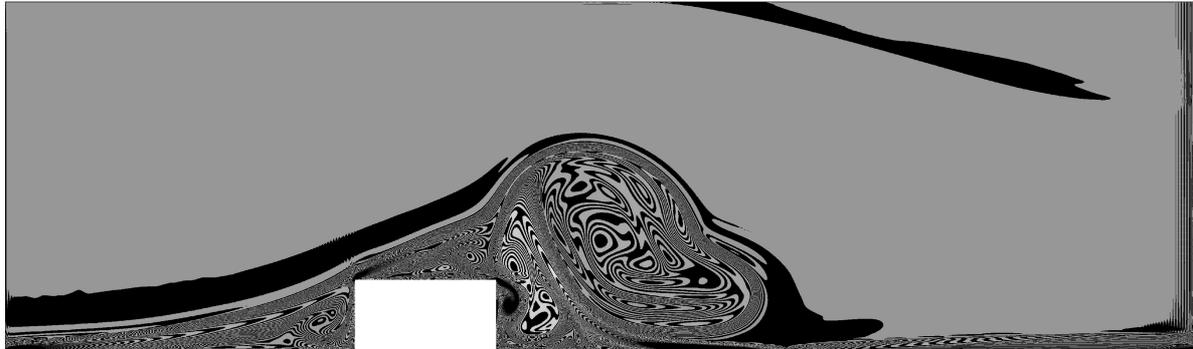


Figura 4: Campo de vorticidade adimensional para o tempo $t = 50,0 H/U_\infty$. Valor mínimo de -10 e máximo de 10. Razão de forma igual a 0,5.

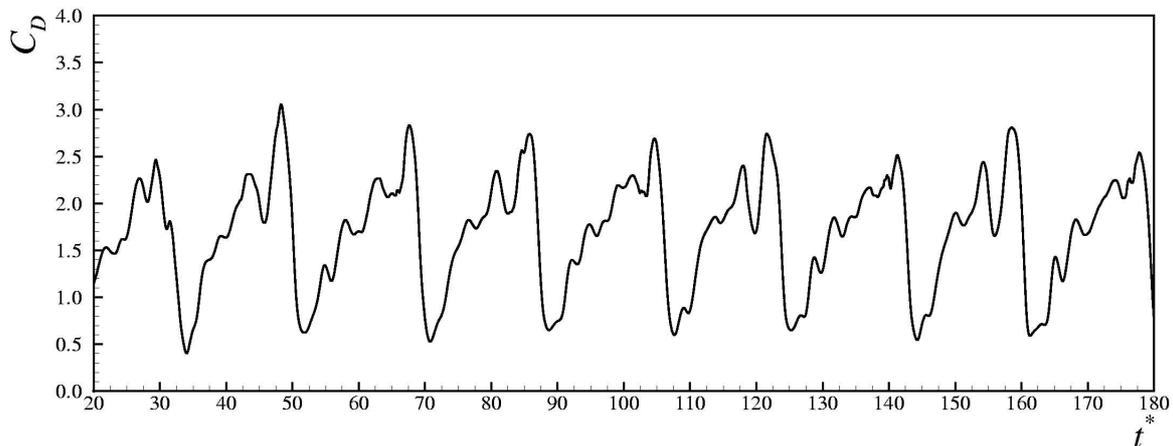


Figura 5: Distribuição temporal do coeficiente de arrasto. Razão de forma 0,5. Coeficiente de arrasto médio de 1,68.

Para estudar o efeito da sombra aerodinâmica, foram selecionados dois parâmetros de distância relativa, definida neste trabalho como a razão entre a distância entre os dois prédios e a altura do primeiro. No primeiro caso, a distância relativa entre os dois prédios corresponde ao comprimento da altura do primeiro prédio (figura 6) e no segundo, corresponde a três vezes a altura do primeiro prédio (figura 9). A altura é a mesma para ambas as edificações. Para todas as estruturas dos casos com sombra aerodinâmica, a razão de forma utilizada foi igual a 2,0. Em ambos os casos, há a formação e convecção de vórtices com comprimentos característicos da ordem do tamanho dos prédios. Observa-se que, para o segundo caso, o comprimento dos vórtices é menor, proporcionando uma maior dissipação da energia cinética de turbulência e conseqüentemente, o ciclo de geração e movimentação dos vórtices pelo domínio computacional também é menor.

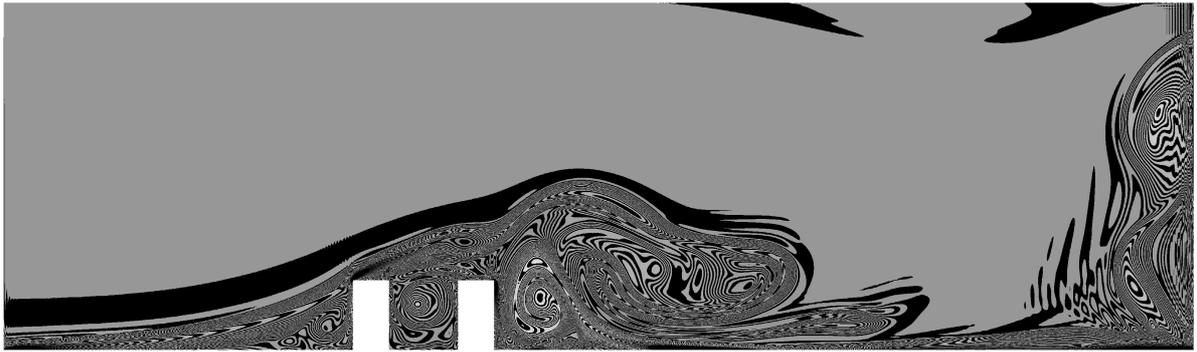


Figura 6: Campo de vorticidade adimensional para o tempo $t = 65,0 H/U_{\infty}$. Valor mínimo de -10 e máximo de 10 . Distância entre os prédios igual à altura dos mesmos.

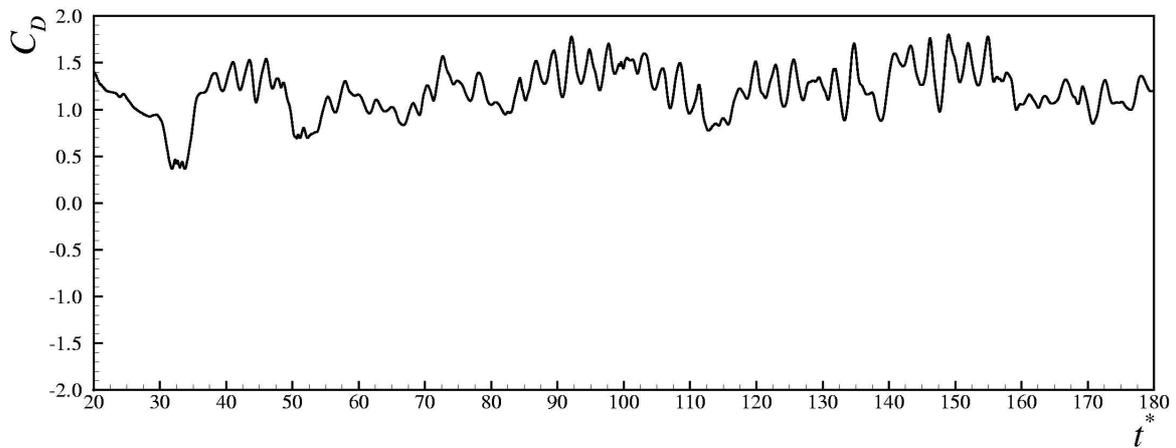


Figura 7: Distribuição temporal do coeficiente de arrasto para o primeiro prédio. Distância entre os prédios igual a altura dos mesmos.

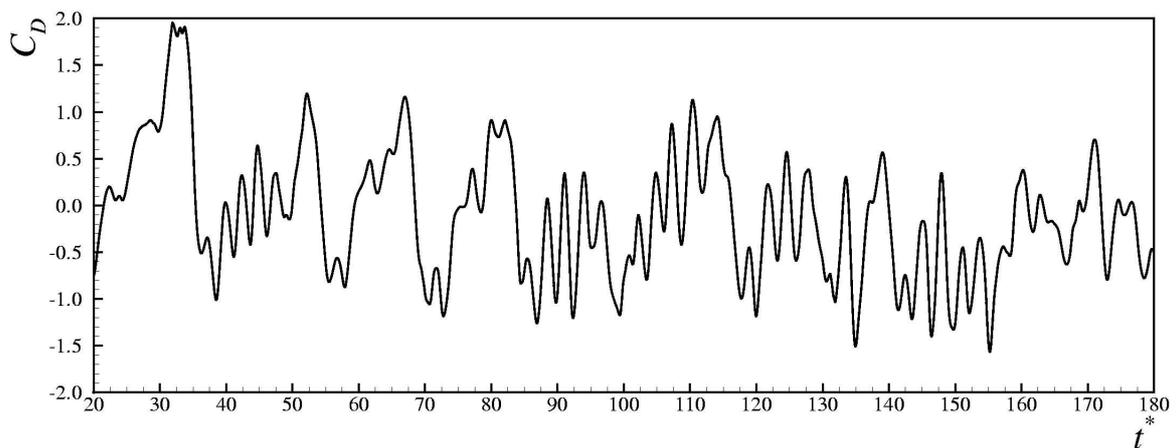


Figura 8: Distribuição temporal do coeficiente de arrasto para o segundo prédio. Distância entre os prédios igual a altura dos mesmos.

Para o caso onde a distância relativa entre os prédios é igual a $1,0$, o coeficiente de arrasto médio foi de $1,34$ para o primeiro prédio, e de $-2,0$ para o segundo. Estes valores correspondem a um carregamento médio de $20,1 \text{ ton/m}$ e $-3,0 \text{ ton/m}$, respectivamente. A amplitude do coeficiente de arrasto instantâneo foi de $1,13$ e $2,58$ para a primeira e segunda

edificação, respectivamente, correspondendo a uma amplitude de carregamento instantâneo de 16,94 ton/m e 38,67 ton/m (figuras 7 e 8).

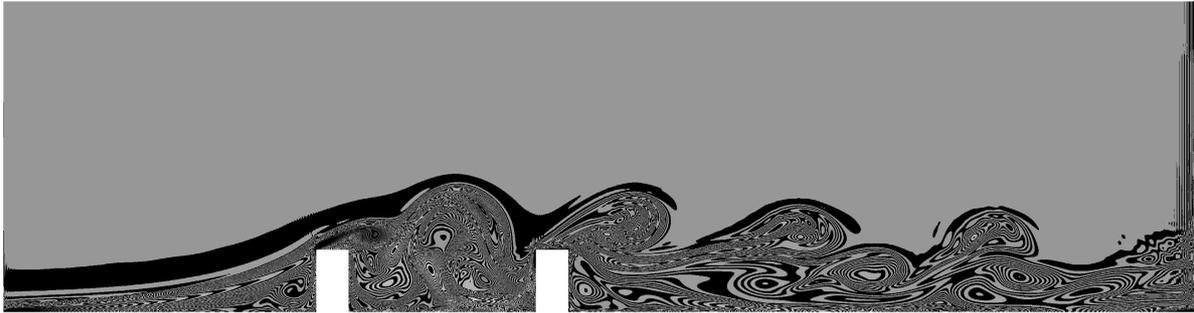


Figura 9: Campo de vorticidade adimensional para o tempo $t = 87,0 H/U_\infty$. Valor mínimo de -10 e máximo de 10 . Distância entre os prédios igual a três vezes a altura dos mesmos.

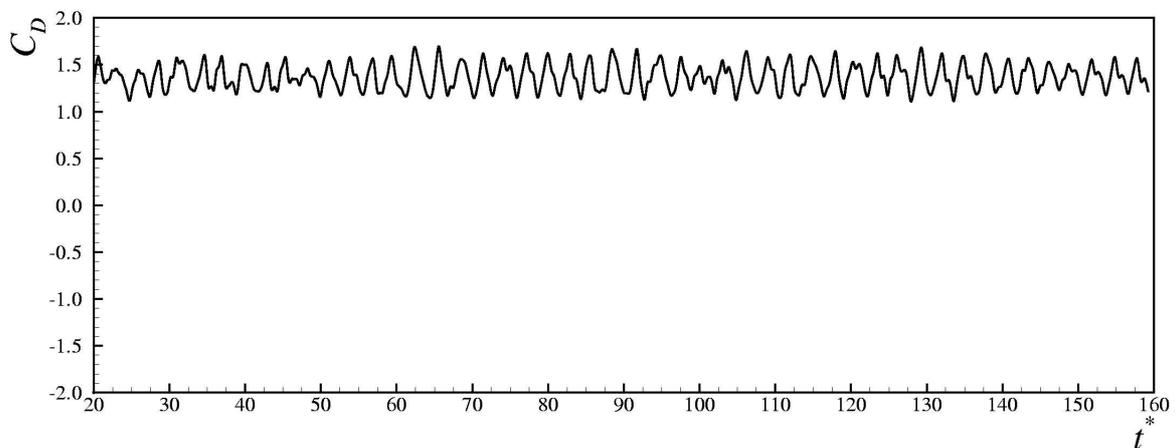


Figura 10: Distribuição temporal do coeficiente de arrasto para o primeiro prédio. Distância entre os prédios igual a três vezes a altura dos mesmos.

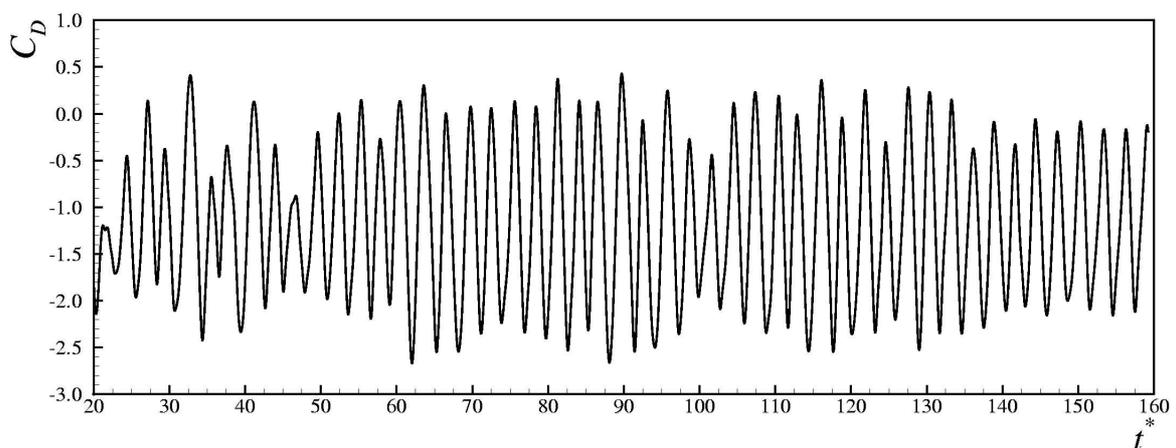


Figura 11: Distribuição temporal do coeficiente de arrasto para o segundo prédio. Distância entre os prédios igual a três vezes a altura dos mesmos.

Para o caso em que a distância relativa é igual a 3,0, o coeficiente de arrasto médio foi de 1,57 para o primeiro prédio, e de $-1,07$ para o segundo, o que corresponde a um

carregamento médio de 23,53 ton/m e $-16,04$ ton/m, respectivamente. A amplitude do coeficiente de arrasto foi de 0,61 e 3,11 para a primeira e segunda edificação, respectivamente (figuras 10 e 11), correspondendo a um carregamento instantâneo de 9,14 ton/m e 46,62 ton/m.

O tempo de CPU necessário para simular o primeiro caso (distância relativa igual a 1,0) foi de 119,0 horas e para o segundo (distância relativa igual a 3,0) foi de 94,0 horas. Uma análise das figuras 7, 8, 10 e 11 permite verificar que o tempo total de simulação é suficiente para estabelecer estatisticamente a médias temporais.

Comparando-se as figuras 3, 7 e 10, pode-se observar que o efeito da segunda estrutura sobre a primeira é de reduzir a solicitação estrutural sobre a mesma. Isto se manifesta na redução do coeficiente de arrasto médio e na redução da amplitude do coeficiente de arrasto instantâneo. No caso do coeficiente de arrasto, esta redução diminui com a distância relativa, enquanto que, para a amplitude do coeficiente de arrasto instantâneo, esta redução aumenta com a distância relativa.

Comparando-se as figura 3, 8 e 11, pode observar que o efeito da primeira estrutura sobre a segunda é de aumentar significativamente a solicitação estrutural sobre a mesma. Apesar de que em ambos os casos, o coeficiente da arrasto médio cai para valores negativos, este benefício é superado pelo aumento significativo na amplitude do coeficiente de arrasto instantâneo, caracterizando um carregamento dinâmico de grande amplitude e alta frequência. Comparando-se as figuras 8 e 11, pode-se observar que este aumento de amplitude e frequência é maior quando a distância relativa é menor.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que, para estruturas bidimensionais simples, estar na sombra aerodinâmica de outra estrutura do mesmo tipo resulta em um aumento significativo da solicitação estrutural. Isto acontece apesar da queda do coeficiente de arrasto médio, já que a amplitude e a frequência do coeficiente de arrasto instantâneo aumentam.

O carregamento aerodinâmico é cíclico tanto para edificações sem sombra como para edificações com sombra. Neste último caso, o coeficiente de arrasto médio se apresenta negativo ou quase nulo para a segunda edificação, mas são encontrados elevados valores da amplitude do coeficiente de arrasto instantâneo. Este fato, ressalta a importância do cálculo deste carregamento utilizando a simulação numérica de grandes escalas, já que um coeficiente de arrasto médio perto de zero pode corresponder a um carregamento dinâmico intenso, justificando o custo computacional deste tipo de simulação.

7. REFERÊNCIAS

- Bobenrieth, R. F. M. “Simulação Numérica de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos através de uma Formulação Compressível para Baixos Números de Mach”, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 1996.
- Hirsch, C. “Numerical Computation of Internal and External Flows”, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- Silveira Neto, A., Grand, D., Métais, O., Lesieur, A. “A Numerical Investigation of the Coherent Vortices in Turbulence behind a Backward-Facing Step”, J. Fluid Mech., Vol.256, pp.1-25, 1993.
- Smagorinsky, J., “General Circulation Experiment with the Primitive Equations”, I. The Basic Experiment, Monthly Weather Review, Vol. 91, pp. 99-164, 1963.