

Simulação numérica na engenharia do vento

Alexandre Luis Braun,⁽¹⁾ Armando Miguel Awruch,⁽²⁾

Trabalho recebido em 24/3/2009 e aprovado para publicação em 18/4/2009.

Resumo

O estudo de problemas envolvendo a ação do vento sobre estruturas tem sido tradicionalmente realizado por meio de técnicas experimentais desenvolvidas em túneis de vento. No entanto, com o crescente avanço na capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores atuais, modelos numéricos cada vez mais complexos e eficientes têm sido elaborados e aplicados nesta área, conferindo à simulação numérica um grau de confiabilidade bastante recomendável. Na abordagem computacional, os escoamentos de vento são simulados pela aplicação de métodos numéricos desenvolvidos pela dinâmica de fluidos computacional (DFC) para a solução das equações que governam a dinâmica dos fluidos. Um modelo de turbulência é usualmente incorporado ao modelo numérico a fim de representar as escalas de turbulência não perceptíveis pela malha gerada no processo de discretização espacial. Campos de pressão e de velocidade do vento são então gerados sobre o domínio de análise e ao longo do período em que a simulação é realizada, os quais são transmitidos à estrutura na forma de forças aerodinâmicas. No presente trabalho, exemplos típicos da engenharia do vento são analisados numericamente empregando-se um modelo baseado no método dos Elementos Finitos (MEF) e desenvolvido no CEMACOM/PPGEC/UFRGS especialmente para esta finalidade.

Palavras-chave: Engenharia do vento. Dinâmica de fluidos computacional (DFC). Interação fluido-estrutura. Método dos elementos finitos (MEF).

⁽¹⁾ Dr. (allbraun@ig.com.br). Pós-Doutorando. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar, CEP 90035-190. Porto Alegre-RS, Brasil

⁽²⁾ Dr. (awruch@adufgrs.ufrgs.br). Professor. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar, CEP 90035-190. Porto Alegre-RS, Brasil

1 Introdução

Os modelos numéricos têm sido empregados atualmente com grande sucesso em aplicações voltadas à determinação de parâmetros para a avaliação da ação do vento sobre estruturas civis (Braun e Awruch 2005; ^aBraun e Awruch 2008; ^aBraun e Awruch 2009). Esta tarefa vem sendo tradicionalmente executada em túneis de vento, onde são empregadas técnicas experimentais desenvolvidas especialmente com o intuito de reproduzir escoamentos de vento naturais e representar o comportamento dinâmico das estruturas sob a ação de forças aerodinâmicas ou aeroelásticas. As análises experimentais em túneis de vento foram de fundamental importância para a compreensão dos principais fenômenos físicos encontrados neste tipo de estudo, viabilizando, com isso, a criação de uma área de pesquisa altamente reconhecida: a engenharia do vento (ver Simiu e Scanlan 1996).

Com a crescente utilização de métodos numéricos nas análises da engenharia do vento, um novo campo de aplicação surge para especialistas em dinâmica de fluidos computacional (DFC), dando origem a uma nova linha de pesquisa, denominada engenharia do vento computacional (EVC) (ver Murakami 1997 e Stathopoulos 1997). A DFC, por sua vez, utiliza-se das técnicas numéricas disponíveis para a obtenção da solução das equações que governam a dinâmica dos fluidos, sendo oferecidos como resultado os campos de velocidade e pressão do escoamento em qualquer ponto nos domínios do espaço e do tempo. Na análise aerodinâmica, por exemplo, são obtidas, ainda, informações adicionais, tais como os coeficientes aerodinâmicos. Eventualmente, quando há um forte acoplamento entre as forças aerodinâmicas e as forças elásticas, inerciais e de amortecimento da estrutura imersa, uma análise aeroelástica se faz necessária, na qual os efeitos de interação entre os meios fluido e estrutural são considerados na simulação (ver ^bBraun e Awruch 2009). Assim, outros dados importantes podem ser acessados, como a resposta dinâmica da estrutura frente à ação do vento.

A análise numérica de problemas da engenharia do vento traz vantagens importantes em relação aos ensaios em túneis de vento, como, por exemplo, uma maior versatilidade para a obtenção de resultados e a possibilidade de uma maior variabilidade no uso de parâmetros físicos e geométricos, ambas com uma quantia muito inferior de recursos financeiros a serem disponibilizados e com um tempo total de pesquisa bem menor. Por outro lado, algumas desvantagens ainda podem ser observadas, como a necessidade do uso de modelos de turbulência a fim de representar as escalas não perceptíveis pela malha gerada no processo de discretização espacial, evitando, assim, um excesso de esforço computacional. No entanto, acredita-se que muito em breve já será possível o emprego de simulação direta (sem a utilização de modelos de turbulência) em análises deste tipo.

No presente trabalho, algumas análises típicas da engenharia do vento são realizadas empregando-se um modelo numérico desenvolvido no PPGE/UFRRGS especialmente para este fim (ver Braun 2007). O modelo baseia-se no método dos elementos

finitos (MEF) (Zienkiewicz et al. 2005) e possibilita tanto a abordagem aerodinâmica (estrutura rígida e indeslocável) como a abordagem aeroelástica (estrutura deformável) dos problemas.

2 Descrição do modelo numérico

A análise numérica dos problemas estudados pela engenharia do vento pode ser realizada empregando-se a abordagem aerodinâmica ou a abordagem aeroelástica. Na análise aerodinâmica, um escoamento de vento é aplicado sobre uma estrutura considerada como rígida e indeslocável, a qual é tratada matematicamente pela aplicação de condições de contorno forçadas de não deslizamento sobre as superfícies de interface sólido-fluido. Por outro lado, na análise aeroelástica a estrutura passa a se constituir como uma parte integrante do problema, necessitando, por isso, de um modelo numérico próprio para a obtenção de sua resposta dinâmica frente à ação do escoamento. Posteriormente, os deslocamentos gerados na estrutura devem ser levados em conta na simulação do escoamento. A troca de informações entre os diferentes meios físicos é realizada pela imposição de condições de compatibilidade cinemática e de equilíbrio sobre as superfícies de interface sólido-fluido, a qual é efetuada por meio do uso de técnicas numéricas de sincronização entre os processos de integração temporal das equações governantes para cada um dos meios envolvidos.

2.1 As equações que governam a dinâmica dos fluidos

Inicialmente, algumas hipóteses com respeito ao tratamento analítico de escoamentos de vento devem ser formuladas com o intuito de determinar os limites de validade do modelo numérico. As seguintes hipóteses são consideradas neste trabalho:

- (1) O ar é caracterizado como um fluido newtoniano;
- (2) Os escoamentos de vento se dão em regime incompressível, sendo tratados através da hipótese de pseudocompressibilidade (Chorin 1967);
- (3) Os efeitos de variação de temperatura são desprezados (processo isotérmico);
- (4) As forças de campo são desprezadas;
- (5) Na abordagem aeroelástica a descrição cinemática dos escoamentos é feita por meio de uma formulação arbitrária Lagrangeana-Euleriana (ALE). No caso de uma abordagem aerodinâmica, emprega-se uma descrição puramente Euleriana (ver Donea et al. 1982);
- (6) Os escoamentos ocorrem em regime turbulento, sendo tratados pela simulação direta de grandes escalas (“LES”) com o modelo submalha dinâmico de Smagorinsky (ver Murakami 1997).

Assim, o sistema de equações que governam o escoamento fica definido da seguinte forma:

(a) Equações de conservação de momentum (Equações de Navier-Stokes):

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_j - w_j) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \text{ em } \Omega_f \quad (1)$$

(b) Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \text{ em } \Omega_f \quad (2)$$

Nas equações acima, as variáveis do escoamento são as componentes v_j do vetor de velocidades \mathbf{v} , as componentes w_j do vetor de velocidade de malha \mathbf{w} e a pressão termodinâmica p , sendo o campo de velocidades de malha determinado a partir do movimento realizado pela estrutura (ver Braun 2007). Essas variáveis são válidas no domínio de análise Ω_f , sendo dadas em função de suas coordenadas cartesianas no espaço, segundo a direção dos eixos x_i , e em função do tempo t . As propriedades físicas do fluido são representadas pela massa específica ρ , viscosidade volumétrica λ , viscosidade cinemática ν e viscosidade cinemática turbulenta ν_t , a qual é calculada ao longo da análise de acordo com as condições instantâneas do escoamento, utilizando-se para isso o modelo dinâmico de Smagorinsky (ver Lilly 1992 e Braun 2007). Além das condições iniciais das variáveis em $t = 0$, devem ser fornecidas as condições de contorno para definir totalmente o problema.

Neste trabalho a solução das equações que governam o sistema é obtida empregando-se o modelo explícito de dois passos de Taylor-Galerkin (Donea 1984; Kawahara e Hirano 1983), no qual os termos com derivadas temporais são expandidos em séries de Taylor, seguindo-se com a aplicação do princípio dos resíduos ponderados dentro do contexto do MEF. O domínio espacial é discretizado empregando-se elementos hexaédricos isoparamétricos de oito nós, com integração reduzida das matrizes de elemento. Maiores informações sobre o modelo numérico para a análise do escoamento podem ser obtidas em Braun (2007) e ^bBraun e Awruch (2009).

2.2 As equações que governam a dinâmica das estruturas

Com base na observação dos problemas estudados pela engenharia do vento, as seguintes hipóteses são consideradas neste trabalho para o modelo analítico da estrutura:

- (1) As estruturas consideradas deformam-se em um processo isotérmico;
- (2) Consideram-se apenas materiais elásticos lineares dentro do regime de pequenas deformações, com não linearidade geométrica (deslocamentos finitos);

(3) A descrição cinemática da estrutura é feita através de uma formulação Lagrangiana atualizada.

Com isso, tem-se que as equações que governam o comportamento dinâmico da estrutura são dadas pelas seguintes expressões:

(a) Equação de conservação de momentum (Equação de Cauchy):

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + \rho b_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \chi \frac{\partial u_i}{\partial t} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad \text{em } \Omega_e \quad (3)$$

(b) Equação de conservação de massa:

$$\int_{\Omega_e} \rho \, d\Omega_e = \int_{\Omega_{e0}} \rho_0 \, d\Omega_{e0} = \text{cte.} \quad (4)$$

(c) Equação constitutiva elástica linear:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \, \varepsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Nas equações acima, as variáveis da estrutura são as componentes u_i do vetor de deslocamentos \mathbf{u} , as componentes b_i do vetor de forças de volume \mathbf{b} , as componentes σ_{ij} do tensor de tensões de Cauchy σ e as componentes ε_{ij} do tensor de deformações ε . Condições iniciais para os vetores de deslocamento e velocidade e condições de contorno para o vetor de deslocamento devem ser fornecidas para definir totalmente o problema.

Neste trabalho, a solução da equação de equilíbrio dinâmico no tempo é obtida empregando-se o método implícito de Newmark, juntamente com o esquema α -Generalizado (ver Kuhl e Crisfield 1999), o qual é utilizado para a manutenção da estabilidade numérica em problemas altamente não lineares. Assim como no escoamento, a discretização da estrutura no espaço é efetuada usando-se elementos finitos hexaédricos isoparamétricos de oito nós, com integração reduzida e um esquema numérico robusto para a estabilização de modos espúrios (ver Duarte Filho e Awruch 2004). Uma descrição detalhada sobre o modelo numérico para a análise de estruturas pode ser encontrada em Braun (2007) e ^bBraun e Awruch (2008).

2.3 As equações que governam a interação fluido-estrutura (IFE)

No presente modelo, a solução do problema aeroelástico é obtida utilizando-se um esquema de acoplamento fluido-estrutura particionado com características superiores de conservação, o qual possibilita o uso da técnica de subciclos entre as análises do flui-

do e da estrutura e de malhas independentes para cada um dos meios físicos existentes (Braun 2007, ^bBraun e Awruch 2009).

Para que o acoplamento fluido-estrutura seja realizado corretamente, as seguintes condições devem ser impostas a ambos os sistemas (fluido e estrutura) sobre a interface:

(a) Equação de equilíbrio de forças:

$$\sigma_e \mathbf{n} = (-\mathbf{p} + \boldsymbol{\tau}_f) \mathbf{n} \quad \text{em } \Gamma_{\text{isf}} \quad (6)$$

(b) Equações de compatibilidade cinemática:

$$\mathbf{x} = \mathbf{u}_e \quad \text{e} \quad \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} \quad \text{em } \Gamma_{\text{isf}} \quad (7)$$

onde σ_e e \mathbf{u}_e são o tensor de tensões e o vetor de deslocamentos da estrutura; \mathbf{p} e $\boldsymbol{\tau}_f$ são o vetor de pressão e o tensor de tensões viscosas do escoamento; \mathbf{x} é o vetor posição da malha do escoamento e \mathbf{n} é o vetor de co-senos diretores da normal em um ponto qualquer da interface fluido-estrutura Γ_{isf} .

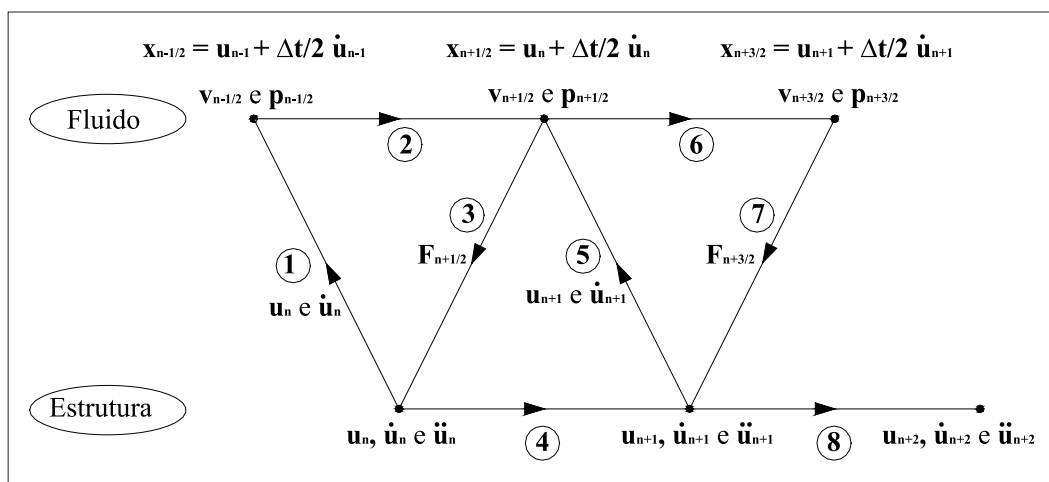


Figura 1: Algoritmo de solução para um problema de interação fluido-estrutura

O algoritmo de solução para um problema de IFE através do esquema numérico utilizado neste artigo pode ser descrito pelos seguintes passos (ver Fig. 1): (1) transferir o movimento dos contornos da estrutura em contato com o fluido ao sistema de equações do escoamento; (2) atualizar os dados referentes à malha do fluido; (3) avançar a análise do escoamento e computar a carga devido à ação do fluxo sobre os contornos da estrutura em contato com o fluido; (4) avançar a análise da estrutura considerando

a ação da carga devido ao escoamento, calculada no passo (3). Repetir os passos 1 a 4 para o próximo incremento de tempo até que o tempo total seja atingido.

3 Simulações numéricas

3.1 Análise aerodinâmica de uma ponte

Neste exemplo é realizada a análise numérica do comportamento aerodinâmico de um protótipo da famosa ponte de Tacoma Narrows (EUA). O protótipo representa, em escala real, o modelo reduzido estudado por Limas (2003) no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS (LAC/UFRGS). Diferentes condições de fluxo são consideradas para a avaliação dos coeficientes aerodinâmicos e do número de Strouhal, sendo avaliados os seguintes ângulos de incidência do vento (α): -8° , -4° , 0° , $+4^\circ$ e $+8^\circ$, onde os valores positivos são considerados no sentido anti-horário. Um detalhe da malha empregada nas análises realizadas é mostrado na Figura 2, a qual é constituída de 473000 elementos com 495362 nós. Em todas as simulações realizadas o escoamento é caracterizado por um número de Reynolds ($Re = \rho V_0 D / \mu$) de 9×10^4 e o incremento de tempo adotado é $\Delta t = 1 \times 10^{-4}$ s.

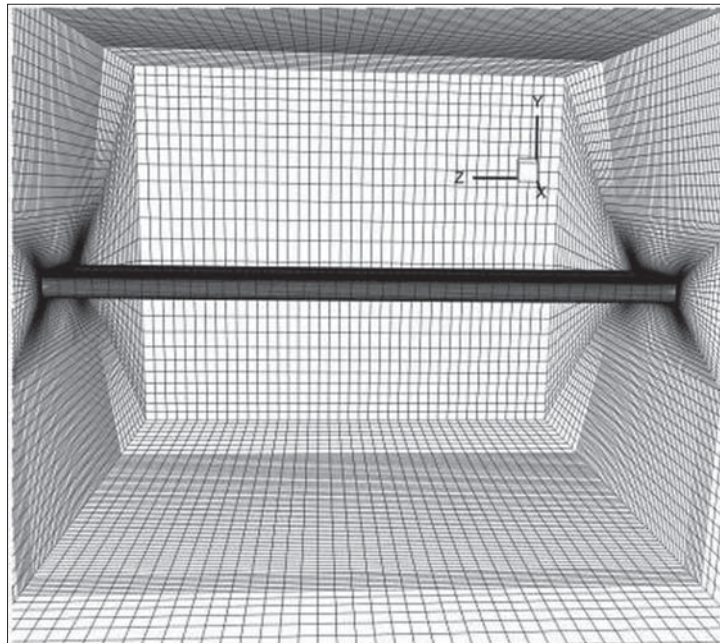


Figura 2: Detalhe da malha empregada na análise da ponte de Tacoma

Na Fig. 3 são apresentados os valores médios de arrasto C_a , sustentação C_l e momento C_{Mz} em função do ângulo de ataque (α), calculados a partir dos históricos dos registros dos coeficientes de força e momento C_{Fx} , C_{Fy} e C_{Mz} obtidos ao longo das respectivas análises. Os resultados são comparados com os perfis obtidos experimentalmente por Limas (2003). Para a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto C_a e de sustentação C_l são usadas aqui as seguintes relações:

$$C_a(\alpha) = C_{Fx}(\alpha) \cos(\alpha) + C_{Fy}(\alpha) \sin(\alpha); \quad C_l(\alpha) = C_{Fy}(\alpha) \cos(\alpha) - C_{Fx}(\alpha) \sin(\alpha) \quad (8)$$

considerando-se ainda que:

$$C_{Fx} = \sum F_x / 1/2 \rho V_0^2 D \quad ; \quad C_{Fy} = \sum F_y / 1/2 \rho V_0^2 D \quad ; \quad C_{Mz} = \sum M_z / 1/2 \rho V_0^2 D^2 \quad (9)$$

sendo o coeficiente de momento C_{Mz} considerado positivo quando age em torno do eixo Z no sentido anti-horário. Dos históricos de C_{Fy} é possível obter a frequência de desprendimento de vórtices f_v e, conseqüentemente, o número de Strouhal ($St = f_v D / V_0$). Tomando-se $D = 2,4$ m, $V_0 = 37,5$ m/s e sendo $f_v = 1,758$ Hz o valor obtido pelo presente trabalho, chega-se ao valor $St = 0,113$, o qual está de acordo com o valor experimental ($St = 0,115$) obtido por Larsen e Walther (1997). Na Fig. 4 são apresentados os campos de pressão e linhas de corrente instantâneos para alguns dos ângulos de incidência estudados, os quais se referem à seção intermediária do modelo ($Z = 36$ m). Mais adiante, na Figura 5, são mostradas as condições de fluxo em termos de linhas de corrente.

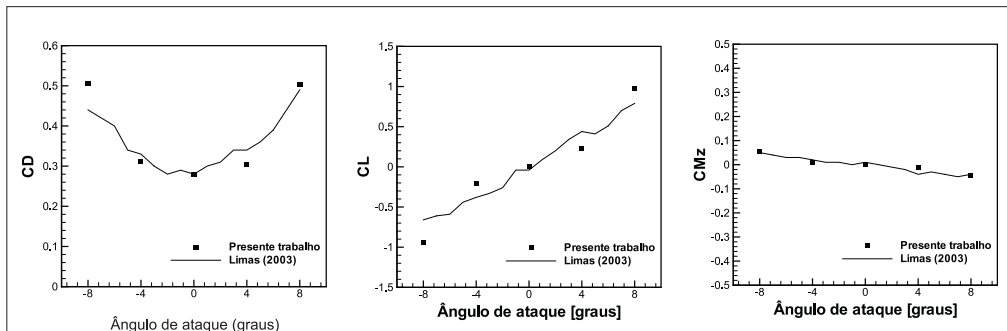


Figura 3: Coeficientes aerodinâmicos médios para a ponte de Tacoma

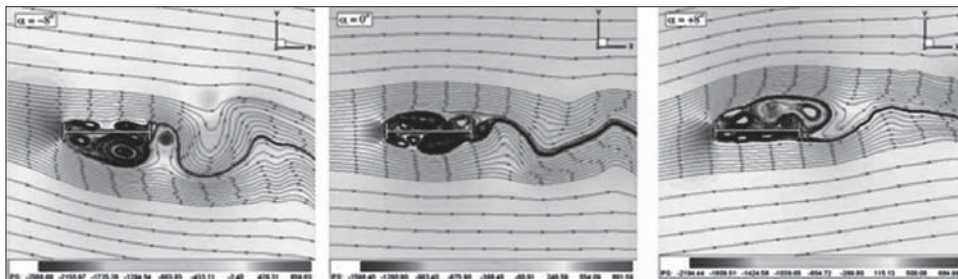


Figura 4: Campos de pressão e linhas de corrente instantâneos sobre a seção da ponte de Tacoma

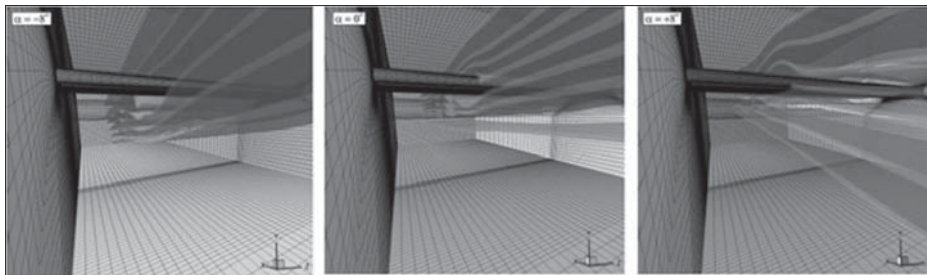


Figura 5: Linhas de corrente instantâneas sobre a ponte de Tacoma

3.2 Análise aerodinâmica de um silo de armazenagem

Neste exemplo é investigado numericamente o comportamento aerodinâmico de um silo de armazenagem submetido a um escoamento de camada limite atmosférica. O estudo realizado neste trabalho emprega as mesmas características físicas e geométricas usadas por Portela e Godoy (2005). Um detalhe da malha utilizada é dado na Figura 6, a qual é constituída de 507700 elementos e 526324 nós. O escoamento é caracterizado por um número de Reynolds igual a 3×10^5 , calculado com base no diâmetro do silo ($D = 30,48$ m) e na velocidade de entrada tomada em $Z = 10$ m ($v_1 = 62$ m/s). O incremento de tempo adotado na integração numérica é $\Delta t = 2 \times 10^{-4}$ s.

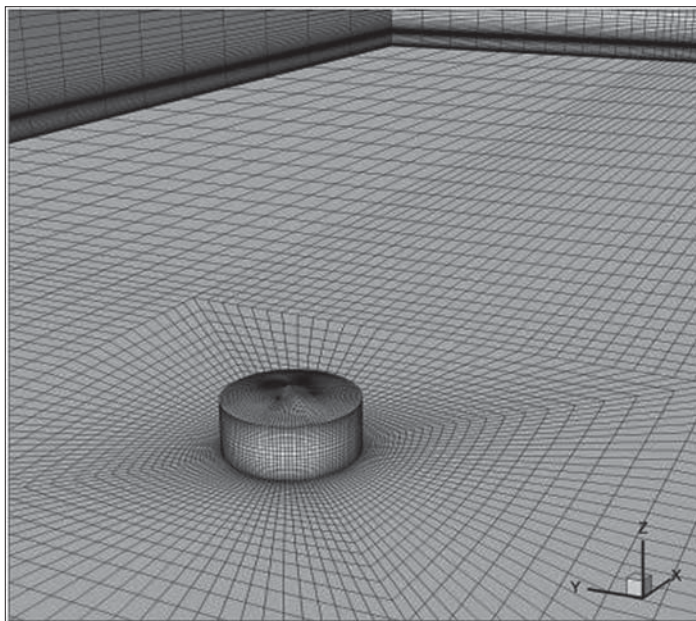


Figura 6: Malha de elementos finitos empregada na análise de um silo de armazenagem

Na Figura 7 é apresentada a distribuição de pressão média sobre a cobertura do silo obtida pelo presente trabalho, juntamente com o resultado obtido pelo trabalho experimental, com o que é possível verificar uma boa conformidade entre os estudos realizados.

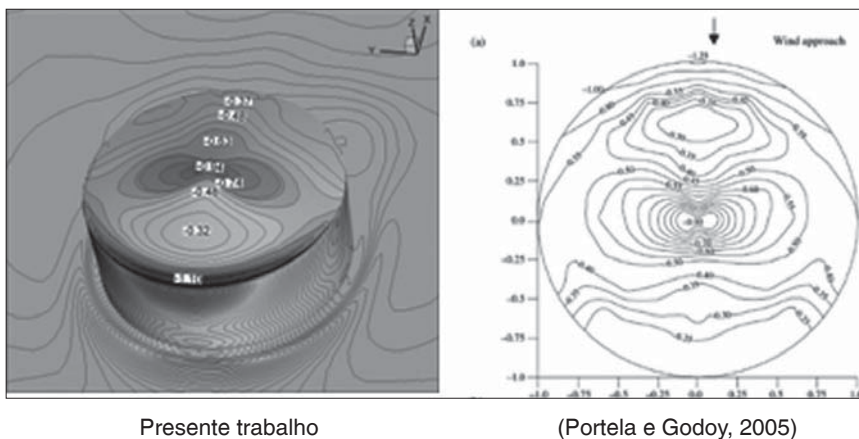


Figura 7: Distribuição da pressão média sobre a cobertura do silo

Por fim, na Figura 8 são mostradas as linhas de corrente instantâneas do escoamento na região em torno do silo, onde são observadas características importantes, como a formação dos vórtices de base na região frontal junto ao solo e a tendência descendente das linhas de corrente sobre a casca cilíndrica para cotas de incidência de até aproximadamente 70% de sua altura.

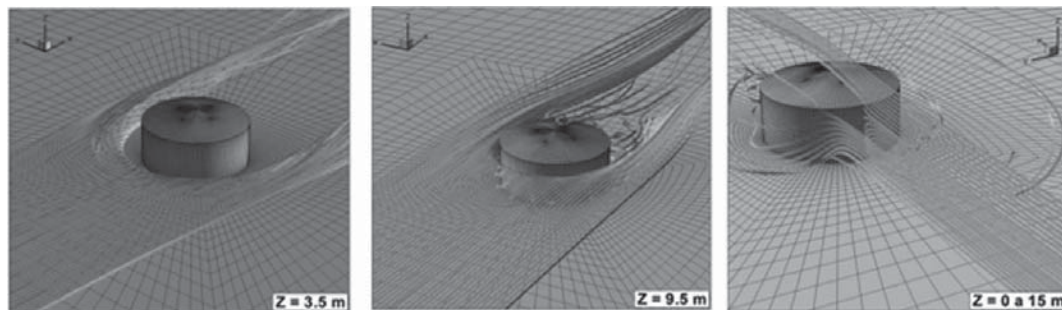


Figura 8: Linhas de corrente instantâneas do escoamento sobre o silo

3.3 Ação do vento sobre um conjunto de edifícios

Nesta seção são determinadas numericamente as condições de circulação de vento em um conjunto de prédios representando um quarteirão da região central da cidade de Montreal (Canadá). Os modelos empregados na representação geométrica dos prédios e a sua distribuição sobre a região de análise seguem as configurações utilizadas

por Stathopoulos e Baskaran (1996), os quais realizaram medições tanto numéricas como também experimentais sobre este mesmo problema, sendo o estudo experimental realizado no túnel de vento do Centro para Estudos de Edificações na Universidade Concordia (Canadá).

Um detalhe da malha de elementos finitos na região próxima aos prédios pode ser visualizado na Figura 9, a qual é constituída de um total de 1268272 elementos e 1318610 nós. Juntamente, são apresentadas as localizações dos pontos de medição do escoamento e suas respectivas numerações. O conjunto é submetido a um escoamento de camada limite atmosférica com um número de Reynolds ($Re = \rho VD/\mu$) de $1,69 \times 10^8$.

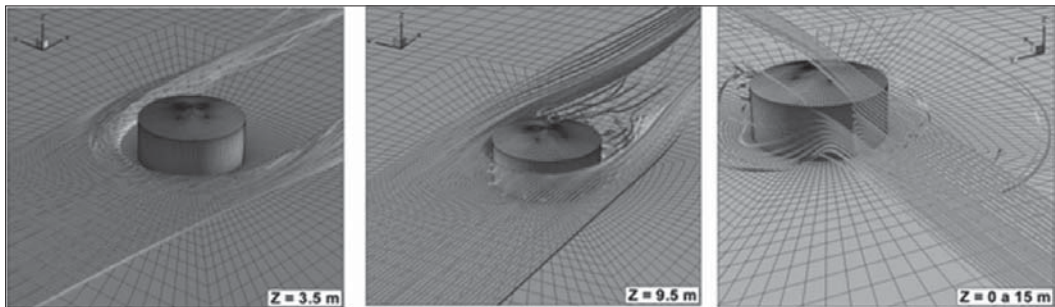


Figura 9: Malha de elementos finitos e pontos de medição empregados na análise da ação do vento sobre um conjunto de prédios

Na Tabela 1 é feita uma comparação entre as medições realizadas nesta tese e no trabalho de Stathopoulos e Baskaran (1996) referentes a valores médios de V_1/V_0 ($V_1 = [v_1^2 + v_2^2]^{1/2}$; V_0 – velocidade de entrada a 2 m), obtidos nos locais indicados na Fig. 9 e avaliados no plano $Z = 2$ m. Verifica-se uma concordância razoável entre as medições realizadas neste trabalho e os resultados experimentais, estando as maiores discrepâncias situadas nos pontos 3, 6 e 8, os quais se localizam em pontos de difícil determinação, inclusive experimentalmente.

Tabela 1: Resultados médios de V_1/V_0 para diferentes locais na região do bloco de prédios

Ponto de medição	Valor medido (V_1/V_0)		
	Presente trabalho	Stathopoulos e Baskaran (1996)	
		Númérico	Experimental
1	0.80	0.73	0.98
2	1.49	0.98	1.32
3	0.34	0.57	0.23
4	1.43	1.08	1.28
5	1.26	0.89	1.02
6	1.14	0.81	0.67
7	0.60	0.96	0.76
8	0.27	0.26	0.05
9	0.61	0.58	0.44
10	0.83	0.84	0.64

Na Figura 10 são apresentadas as linhas de corrente instantâneas obtidas em diferentes níveis de altura. Em $Z = 5$ m observa-se a ação dos vórtices de base, criando as protuberâncias visíveis na superfície de linhas de corrente, envolvendo externamente a região do bloco de edifícios. Uma zona de grande circulação é verificada à esquerda da figura em razão da passagem existente entre os prédios A e B. Para $Z = 10$ m, o fluxo é elevado ao encontrar com os prédios A e B, sendo puxado em direção ao solo; logo após, em razão da ocorrência de uma zona de sucção entre os prédios B e X, a qual se forma em virtude da grande recirculação presente nesta área. Os prédios C e E também são fortemente influenciados por estarem situados justamente na região de esteira do prédio A e da passagem existente entre os edifícios A e B. Para $Z = 25$ m e $Z = 40$ m, o fluxo incidente é elevado ao se deparar com o edifício X, tomando uma tendência descendente na região de esteira, após a zona de recirculação jusante do bloco de edifícios.

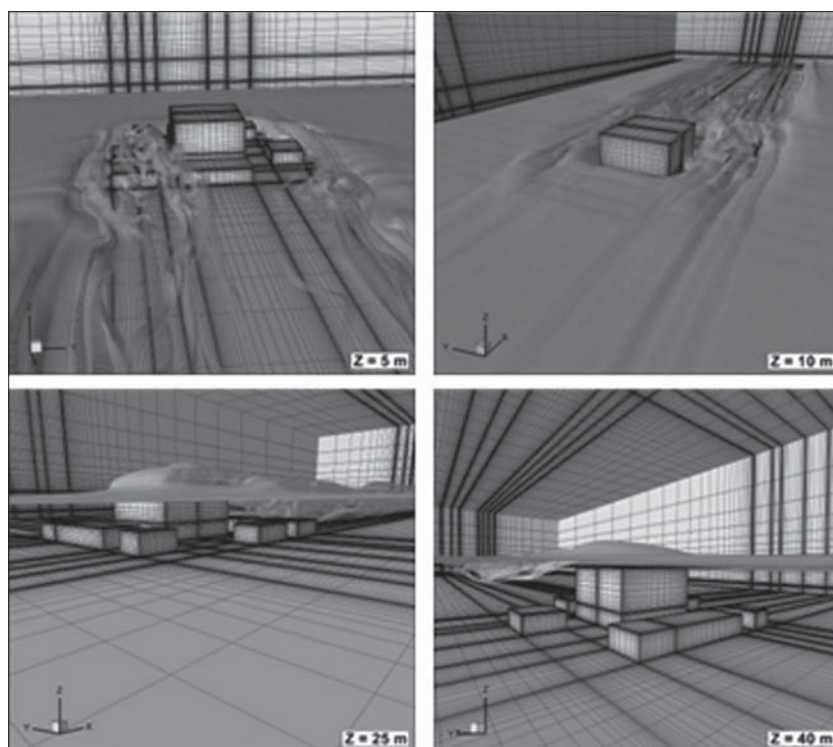


Figura 10: Linhas de corrente instantâneas integradas no espaço sobre o bloco de edifícios

3.4 Análise de ventilação em um modelo simplificado de edificação

Neste exemplo é realizada a simulação numérica dos estudos de avaliação das condições de ventilação natural para um modelo simples de edificação, o qual reproduz uma das configurações estudadas por Jiang et al. (2003). Neste artigo foram realizadas

análises numéricas e experimentais para a determinação das condições de circulação de vento tanto no ambiente interno como no exterior da edificação, considerando diferentes configurações de abertura. Os resultados experimentais foram obtidos no túnel de vento da Universidade de Cardiff, no Reino Unido. No presente trabalho, considera-se um escoamento de vento de camada limite atmosférica incidindo sobre o modelo de edificação, o qual é caracterizado por uma casca cúbica com uma única abertura na parede de barlavento, reproduzindo as dimensões de uma porta.

As características da malha de elementos finitos na região de localização da edificação são apresentadas Figura 11, a qual é formada de 1037660 elementos com 1073919 nós. O escoamento é caracterizado por meio de um número de Reynolds igual a $1,4 \times 10^5$, calculado com base na dimensão característica da edificação ($D = 2,5$ m) e na velocidade de entrada tomada na cota de teto da edificação ($Z = 2,5$ m).

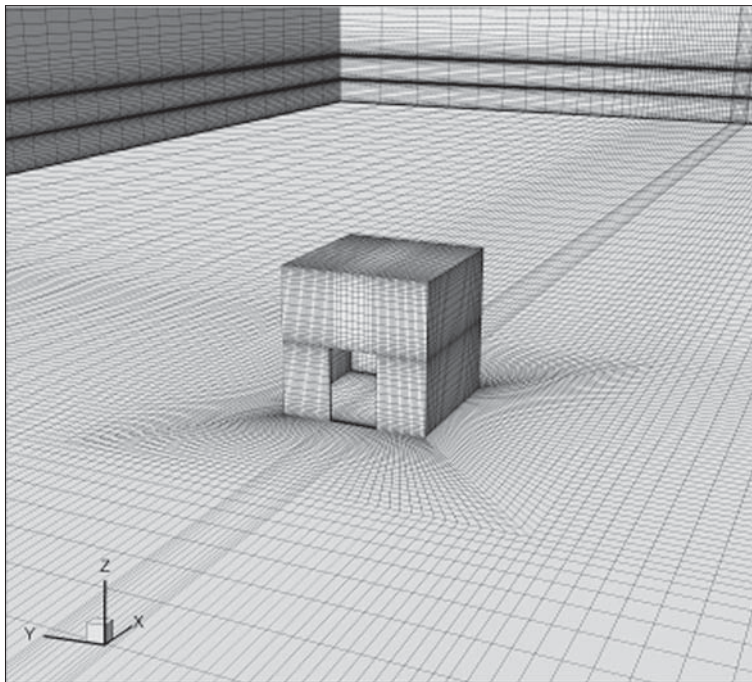


Figura 11: Malha de elementos finitos empregada na análise de ventilação de uma edificação.

Na Figura 12 são apresentados os campos de pressão obtidos pelo presente trabalho em diferentes planos de visualização, os quais correspondem ao plano de simetria na direção do escoamento e a três cotas distintas do domínio de análise. Na mesma figura, linhas de corrente obtidas a partir de campos instantâneos de velocidade são mostradas e comparadas com resultados experimentais. Nota-se claramente nas figuras a ação dos vórtices de base na região frontal da edificação, onde é gerada uma

barreira para as massas de ar da corrente incidente, as quais são incorporadas a estes vórtices e jogadas em direção às laterais da edificação. Para $Z = 1,5$ m, o fluxo de ar que chega nas imediações da edificação já não percebe mais a influência da zona frontal de recirculação, desenvolvendo-se uma distribuição de pressões externa ao prédio típica para os casos de escoamentos sobre corpos cúbicos, valendo o mesmo para $Z = 2,25$ m. Em todos os casos observa-se a formação de um estado de sobrepressão no interior da edificação, o qual impede a entrada de massas de ar e a circulação interna. É possível também observar claramente a zona de atuação dos vórtices de base, desenvolvidos na região frontal da edificação. Por fim, para $Z = 2,25$ m o escoamento sofre uma ação ascendente junto ao prédio, criando zonas de separação do fluxo junto aos cantos de sotavento do teto e criando uma esteira que se projeta sobre a zona de recirculação atrás da edificação.

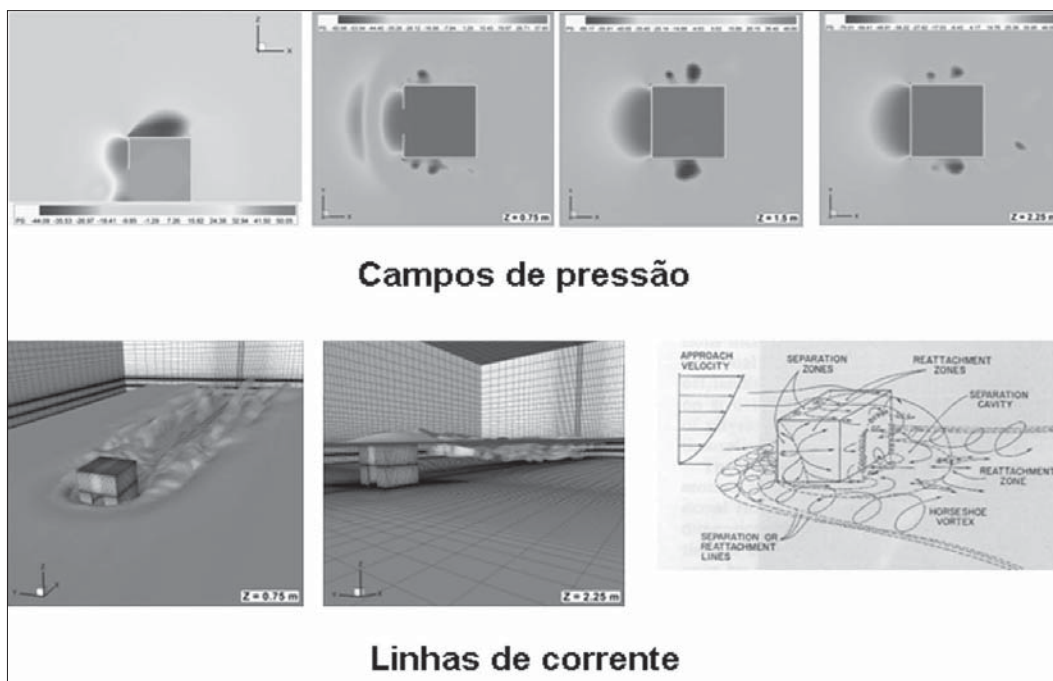


Figura 12: Campos de pressão e linhas de corrente obtidos na análise de ventilação de uma edificação

Na Figura 13 são mostrados perfis de velocidade média obtidos pelo presente trabalho juntamente com os resultados experimentais de Jiang et al. (2003), os quais se referem a diferentes pontos de medição ao longo da linha de simetria na direção do escoamento. Vale lembrar que a posição do prédio compreende as coordenadas $X = 20$ m e $X = 22,5$ m. Como se pode constatar, os resultados aqui obtidos mostram uma boa concordância com o estudo experimental.

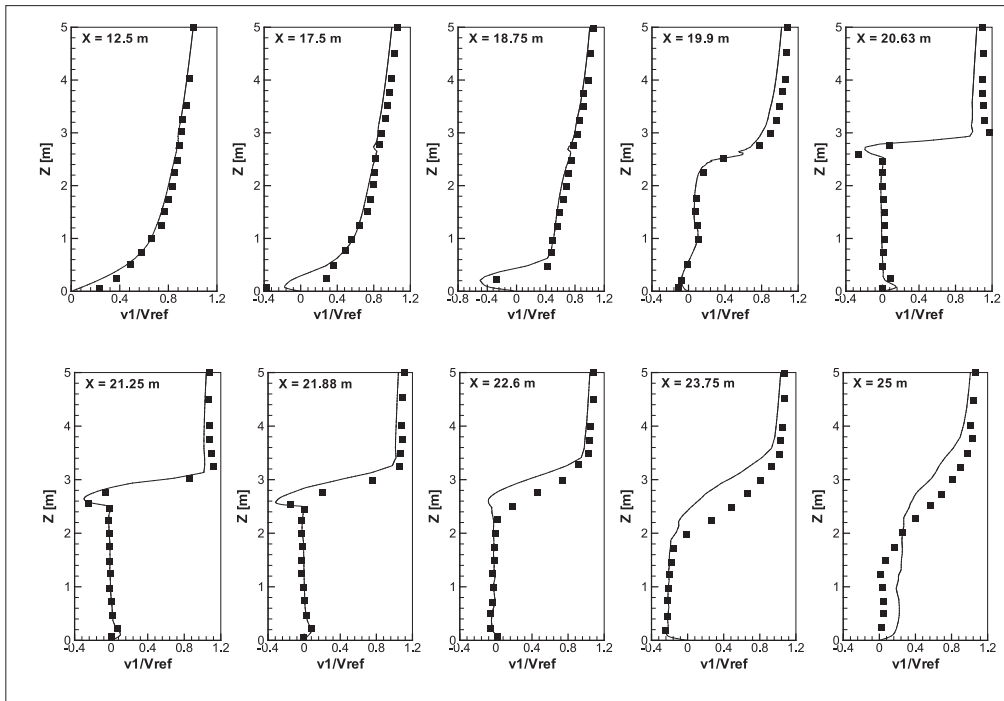


Figura 13: Perfis de velocidade média obtidos na análise de ventilação de uma edificação

3.5 Análise aeroelástica de edifício alto

Nesta seção é realizada numericamente a análise aeroelástica de um modelo de edifício alto sob a ação de um escoamento de vento de camada limite atmosférica, o qual foi analisado experimentalmente no túnel de vento do LAC/UFRGS (ver Miguel, 2003; Trein, 2005). A malha de elementos finitos referente ao escoamento é constituída de 368800 elementos e 383613 nós e a malha empregada na discretização da estrutura contém 5 x 8 x 25 elementos (ver Fig. 14).

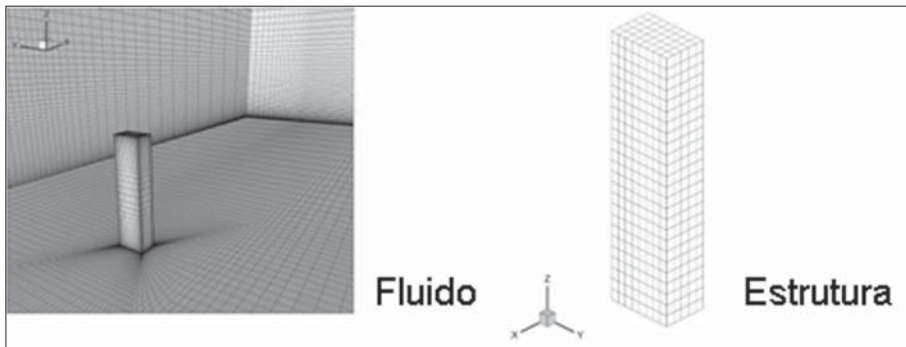


Figura 14: Malhas empregadas na análise aeroelástica de um edifício alto.

O escoamento é caracterizado por um número de Reynolds igual a 8×10^4 , calculado com base na dimensão característica da edificação ($D = 45 \text{ m}$) e na velocidade de entrada tomada em $Z = 180 \text{ m}$ ($v_1 = 100 \text{ m/s}$), sendo a integração do fluido realizada usando-se $\Delta t = 6,5 \times 10^{-4} \text{ s}$. O perfil de velocidades na entrada do domínio é gerado de tal forma que a velocidade em $Z = 180 \text{ m}$ reproduza a velocidade crítica para o fenômeno de vibrações laterais induzidas por desprendimento de vórtices. A estrutura é caracterizada pelas seguintes propriedades físicas: ρ (massa específica) = 1600 kg/m^3 , ν (coeficiente de Poisson) = $0,2$ e E (módulo de elasticidade) = $3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, o qual leva a uma frequência natural de 0.2 Hz . A integração da estrutura é realizada com $\Delta t = 1,3 \times 10^{-2} \text{ s}$.

Na Figura 15 são apresentados os resultados obtidos em termos dos históricos de deslocamentos avaliados no topo do edifício. Os deslocamentos foram medidos nas duas direções principais da seção, os quais seguem a orientação dos eixos X e Y do domínio de análise. O trabalho experimental de Trein (2005) aponta para um deslocamento médio longitudinal em torno de $1,6 \text{ m}$, o que coincide com o resultado obtido neste trabalho. Na direção transversal, onde ocorre a instabilidade, Miguel (2003) estima uma amplitude de deslocamentos RMS de $11,56 \text{ m}$, um valor um pouco superior ao obtido pelo presente trabalho ($10,80 \text{ m}$). Na mesma figura é mostrada também uma das configurações deformadas da estrutura juntamente com os respectivos vetores de força que agem sobre o edifício devido à ação do escoamento.

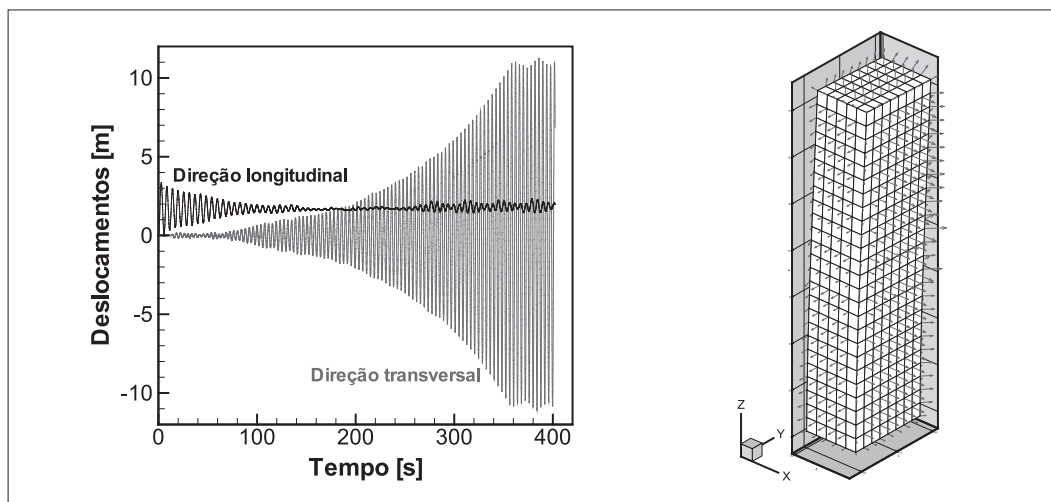


Figura 15: Históricos de deslocamentos no topo e configuração deformada do edifício

Campo de pressão e linhas de corrente instantâneos obtidos neste trabalho na região do edifício são mostrados na Figura 16, de onde se pode verificar a perfeita reprodução dos principais fenômenos físicos do escoamento encontrados neste tipo de análise.

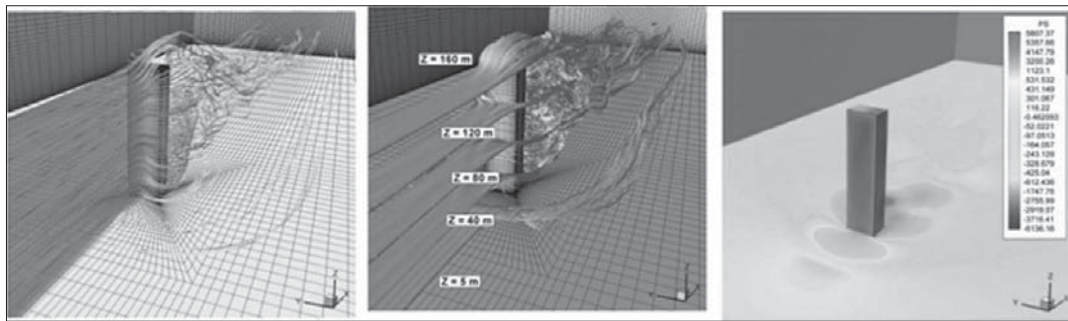


Figura 16: Malha de elementos finitos, campos de pressão e linhas de corrente instantâneos obtidos na análise aeroelástica de um edifício alto

4 Conclusões

No presente trabalho foram analisados alguns dos problemas mais importantes encontrados no campo da engenharia do vento, empregando um modelo numérico desenvolvido especialmente para este fim. Como pôde ser verificado, o presente modelo consegue reproduzir adequadamente os principais fenômenos físicos presentes em cada exemplo estudado. Algumas melhorias ainda podem ser incorporadas no esquema numérico atual, tais como a introdução de flutuações nos perfis de velocidade de entrada, a fim de reproduzir a turbulência na corrente incidente, e um algoritmo de adaptação de malhas, com o intuito de otimizar o processo de discretização do domínio de análise de acordo com as necessidades locais em diferentes regiões do escoamento.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Referências

- Braun A.L. and Awruch, A.M. (2005). Aerodynamic and aeroelastic analysis of bundled cables by numerical simulation. *Journal of Sound and Vibration*, v. 284, p. 51-73.
- Braun, A.L. (2007). *Simulação Numérica na Engenharia do Vento Incluindo Efeitos de Interação Fluido-Estrutura*. Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre (disponível em: <http://www.sabi.ufrgs.br>).
- ^aBraun, A.L. and Awruch, A.M. (2008). Finite element simulation of the wind action over bridge sectional models: application to the Guamá River Bridge. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 44, p. 105-122.
- ^bBraun, A.L. and Awruch, A.M. (2008). Geometrically nonlinear analysis in elastodynamics using the eight-node finite element with one-point quadrature and the generalized-alpha method. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 5, p. 17-45.
- ^aBraun, A.L. and Awruch, AM. (2009). Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. *Journal of Computers and Structures*, doi:10.1016/j.compstruc.2009.02.002.

- ^bBraun, A.L. and Awruch, A.M. (2009). A partitioned model for fluid-structure interaction problems using hexahedral finite elements with one-point quadrature. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, doi: 10.1002/nme.2566.
- Chorin, A.J. (1967). A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. *Journal of Computational Physics*, v. 2, p. 12-26.
- Donea, J., Giuliani, S. and Halleux, J.P. (1982). An arbitrary Lagrangean-Eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 33, p. 689-723.
- Donea, J. (1984). A Taylor-Galerkin method for convective transport problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 20, p. 101-119.
- Duarte Filho, L.A. and Awruch, A.M. (2004). Geometrically nonlinear static and dynamic analysis of shells and plates using the eight-node hexahedral element with one-point quadrature. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 40, p. 1297-1315.
- Jiang, Y., Alexandre, D., Jenkins, H., Arthur, R. and Chen, Q. (2003). Natural ventilation in buildings: measurements in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 91, p. 331-353.
- Kawahara, M. and Hirano, H. (1983). A finite element method for high Reynolds number viscous fluid flow using two step explicit scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 3, p. 137-163.
- Kuhl, D. and Crisfield, M.A. (1999). Energy-conserving and decaying algorithms in non-linear structural dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 45, p. 569-599.
- Larsen, A. and Walther, J.H. (1997). Aeroelastic analysis of bridge girder sections based on discrete vortex simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 67/68, p. 253-265.
- Lilly, D.K. (1992). A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. *Physics of Fluids*, v. A4, n. 3, p. 633-635.
- Limas, L.F. (2003). Determinação das Características Aerodinâmicas de Seções Transversais de Pontes em Túnel de Vento. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Miguel, L.F.F. (2003). Estudo Teórico e Experimental de um Edifício Alto Submetido à Ação do Vento. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre (disponível em <http://www.sabi.ufrgs.br>).
- Murakami, S. (1997). Current status and future trends in computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 67/68, p. 3-34.
- Portela, G. and Godoy, L.A. (2005). Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with conical roof. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 61, p. 786-807.
- Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1996). *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, New York, 3rd ed.
- Stathopoulos, T. (1997). Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 67/68, p. 509-532.
- Trein, C.A. (2005). Modelagem Dinâmica Equivalente de Edifícios Altos Submetidos à Ação do Vento. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre (disponível em <http://www.sabi.ufrgs.br>).
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Zhu, J.Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis & Fundamentals*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 6th ed.

Numerical simulation applied to wind engineering

Abstract

Experimental techniques developed in wind tunnels have been traditionally employed in the evaluation of the wind action on structures. However, with the rapid progress registered in computer technology, complex and efficient numerical models have been developed and applied in this area, which presently renders numerical simulation a very reliable tool. In approach described herein, wind flows are simulated using numerical models from Computational Fluid Dynamics (CFD) to solve the fluid flow governing equations. Turbulence models are also implemented into the numerical code in order to represent flow scales under the refinement level presented by the mesh created in the spatial discretization procedure. Pressure and velocity fields referring to the wind flow are obtained over the spatial domain throughout the simulation period, which are converted into aerodynamic forces on the fluid-structure interface. In the present work, typical wind engineering examples are analyzed numerically using a model based on the Finite Element Method (FEM) and specially developed at the CEMACOM/PPGEC/UFRGS laboratory to simulate wind action over structures.

Key words: Wind engineering. Computational fluid dynamics (CFD). Fluid-structure interaction. Finite element method (FEM).

1 Introduction

Application of numerical tools taken from Computational Fluid Dynamics (CFD) in Wind Engineering problems led to a new research area: Computational Wind Engineering (CWE). Pressure and velocity fields and aerodynamic coefficients are usually obtained in numerical simulations using the aerodynamic approach, where immersed structures are considered as rigid and motionless bodies. On the other hand, when aerodynamic forces developed by the fluid flow and inertial/elastic forces of the structure are strongly coupled, the numerical analysis is performed through an aeroelastic analysis, where fluid-structure interaction algorithms must be considered in order to obtain the structural response under the wind action and its respective influence over the flow field.

Numerical simulation may lead to important improvements when compared to wind tunnel analysis, such as the facility for collecting results and great versatility for changes in the geometrical and physical parameters. Nevertheless, some drawbacks may be still found in the numerical models, such as the need of a turbulence model to simulate fluid motions of the smallest flow scales in order to avoid excessive computational efforts. However, in a near future direct simulation of turbulent flows (without employing turbulence modeling) will be a very feasible task for this kind of problem.

2 Numerical model overview

2.1 Flow governing equations

Wind flow simulations are performed considering the following hypothesis:

- 1) Air is considered as a Newtonian fluid;
- 2) Natural wind streams are considered to be within the incompressible flow range; the pseudo-compressibility approach is used to describe analytically the mass balance in the flow field;
- 3) Wind is always flowing with a constant temperature (isothermal process);
- 4) Gravity forces are neglected in the fluid equilibrium;
- (5) Aeroelastic analyses are performed considering an arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation for the kinematical description of the flow. Aerodynamic analyses are performed considering a classical Eulerian formulation;
- (6) Turbulent flows are analyzed using Large Eddy Simulation (LES) and the dynamic sub-grid model.

The system of governing equations for the flow field is constituted by the Navier-Stokes equations and the mass conservation equation. An explicit two-step Taylor-Galerkin model is utilized to solve the flow problem in the time domain. The spatial domain is discretized using the Finite Element Method (FEM) with eight-node hexahedral elements and one-point quadrature.

2.2 The structure governing equations

A suitable analytical model to describe structural dynamics in wind engineering problems should present the following characteristics:

- 1) Energy equilibrium is maintained without heat exchange (isothermal approach);
- 2) The material composing the structure is linear elastic and may undergo large displacements and rotations with small strains;
- 3) The structural motion is described using an updated Lagrangean formulation.

The governing equations adopted in this work for the structural analysis are the momentum equations, the mass conservation principle and the hypoelastic constitutive equation. The implicit Newmark method with the Generalized- α scheme are utilized to solve the structure problem in the time domain. The spatial discretization is performed using eight-node hexahedral finite elements with one-point quadrature and hourglass control.

3 Numerical Simulations

3.1 Aerodynamic analysis of a bridge deck

This first numerical application presents the aerodynamic analysis of a numerical model representing the Tacoma Narrows bridge. The bridge deck is submitted to different angles of wind incidence in order to obtain circulation patterns of the wind flow around the bridge deck as well as the aerodynamic coefficients as functions of the angle of attack of the incident wind stream and the Strouhal number.

3.2 Aerodynamic analysis of a storage silo

The aerodynamic behavior of a storage silo is simulated in this example. The silo is submitted to an atmospheric boundary layer flow and the pressure distributions over the silo surface as well as circulation patterns of the flow around the silo location are obtained.

3.3 Wind action over a group of buildings

This example presents a real urban area, which is selected as a test case for the computation of wind environment conditions around buildings immersed in a flow with atmospheric boundary layer characteristics. Wind speeds are measured at some locations around the buildings and flow patterns are also obtained.

3.4 Ventilation analysis of a building model

The present application deals with the computation of airflow conditions around and within a building-like body with an opening in windward wall, which is immersed in a wind flow with atmospheric boundary layer characteristics. Results are obtained in terms of pressure fields inside and outside the building, flow patterns around the building location and velocity profiles measured along the symmetry line in the flow direction.

3.5 Aeroelastic analysis of a high-rise building

The numerical simulation of an aeroelastic analysis is performed in this example using a high-rise building model submitted to an atmospheric boundary layer profile with a wind speed that leads to large lateral vibrations. Structural responses and flow patterns around the building are obtained.

4 Conclusions

A numerical model to simulate Wind Engineering problems was presented in this work. Some typical applications were analyzed where results obtained by the present algorithm were compared to experimental data from wind tunnel studies. It was verified that the numerical scheme proposed in this paper predicted well the physical phenomena related to the examples simulated here. Some improvements may be performed in the present formulation in order to obtain a better approach for the physical problem as well as a more efficient code. Suggestions include implementation of a numerical model to consider turbulence fluctuations in the inflow boundary conditions and a numerical algorithm for adaptative meshes.