

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM TORNO DE EDIFÍCIOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE VÓRTICES COM VISUALIZAÇÃO GRÁFICA EM REALIDADE VIRTUAL**Gilda Lúcia Bakker Batista de Menezes**

UFRN - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal
RN - Brasil - cep. 59072-970

gildamenezes@uol.com.br

Zenaide Alves de Araújo

UFRN - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal
- RN - Brasil - cep. 59072-970

zenaide@dem.ufrn.br

Ângelo Roncalli Oliveira Guerra

UFRN - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal
- RN - Brasil - cep. 59072-970

angelo@reitoria.ufrn.br

Resumo. Neste trabalho é feita a simulação do escoamento de ar em torno de edifícios, tendo em vista estudos estruturais ou de conforto de transeuntes. O número de Reynolds utilizado é da ordem de 10^6 . Devido à complexidade do problema tridimensional, foram estudadas seções do escoamento, tornando esta análise, bidimensional. As edificações são simuladas através do Método de Painéis com fontes distribuídas. O escoamento, considerado incompressível, é simulado através do Método de Vórtices, que usa uma descrição Lagrangiana. Os vórtices de Lamb, gerados em toda a superfície dos prédios são deslocados por efeito da convecção através de um esquema que utiliza as fórmulas de Euler (1ª ordem) e Adams-Bashforth (2ª ordem). A difusão dos mesmos é feita através do Método do Avanço Randômico. Os coeficientes de arrasto são calculados pela integração dos campos de pressões. A simulação tomou por base um programa já existente, testado para o caso de um cilindro isolado. Os resultados obtidos demonstram boa concordância com os encontrados na literatura e foram modelados através de Realidade Virtual, utilizada nesta situação, como mais uma opção de ferramenta de visualização gráfica.

Palavras chave: Método de Vórtices, escoamento incompressível, cargas aerodinâmicas, edifícios, Realidade Virtual.

1. Introdução

Nas últimas décadas, vários estudos sobre escoamentos de ar em torno de edificações têm sido realizados. Sejam experimentais ou numéricos, esses estudos são justificados por razões referentes à determinação de carregamentos para cálculos estruturais, à previsão da dispersão de fumaça, gases tóxicos e poluentes em geral e ao estudo do conforto humano, analisando processos físicos em uma faixa que abrange a escala humana até a escala urbana. Bibliografia referente ao escoamento em torno de corpos, pode ser encontrada em Blessmann (1989), Martinuzzi e Tropea (1993), Ferreira (1999), Murakami et al (1999), Tamura e Miyagi (1999), Breuer et al (2000) e Menezes (2001), entre outros.

Seja qual for a justificativa para a realização de simulações de escoamento de ar em torno de edifícios, verifica-se que os mesmos, por suas configurações geométricas, salvo alguma exceção, assumem as características pertinentes aos corpos rombudos, que apresentam a separação da camada limite e a formação de uma esteira viscosa.

Não sendo possível a solução analítica das equações de Navier-Stokes, que descrevem o movimento do fluido, esta deve ser obtida de maneira aproximada, quando as situações permitem que as referidas equações sejam simplificadas, ou através de aproximações feitas com métodos numéricos. De um modo geral, esses métodos numéricos têm cada um, sua própria faixa de aplicação, podendo ser divididos em três categorias principais, ou seja, métodos que utilizam uma descrição euleriana, lagrangiana ou as duas descrições juntas.

Neste trabalho utilizou-se o Método de Vórtices (Hirata, 2000), que usa uma descrição lagrangiana do campo de escoamento, utilizando a teoria potencial juntamente com a simulação dos efeitos viscosos através de vórtices que são induzidos no campo fluido. Este processo apresenta, entre outras, a vantagem de não utilizar malhas, sendo necessária apenas a especificação de condição de contorno no corpo.

Este estudo tem por objetivo a análise do escoamento externo em torno de edificações e a influência da forma e da proximidade com outros prédios, utilizando-se para tal, simulações numéricas realizadas através do Método de Vórtices, sendo as esteiras formadas, visualizadas através de Realidade Virtual. As referidas simulações foram realizadas para alguns casos (Bobenrieth et al, 2000) onde a velocidade incidente é a máxima já encontrada no Brasil, segundo a Norma Brasileira (NBR 6123, 1987), ou seja, 50 m/s, e para casos com a velocidade de 4,9 m/s, considerada uma

velocidade média de vento compatível com a encontrada na cidade de Natal. Na primeira situação, foi utilizado um número de Reynolds de $3,19 \times 10^8$ e no segundo estudo um Reynolds de $5,0 \times 10^6$.

No próximo item, será descrito o modelo matemático adotado, formulado o problema e apresentado o método de solução. O item 3 descreve a modelagem das edificações, assim como a visualização gráfica das esteiras obtidas com o Método de Vórtices, através de Realidade Virtual. No item 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos. Finalmente, o item 5, trata das conclusões formuladas.

2. O Modelo Matemático

Devido à complexidade envolvida na simulação de escoamentos tridimensionais, tomou-se uma seção do sistema, tornando bidimensional o problema em questão. Em seguida, foi considerada uma situação típica de escoamento de um fluido viscoso, o ar, incidindo sobre os edifícios em estudo. Este escoamento é demonstrado na Fig. (1), onde "U" é a velocidade do escoamento incidente, "S₁" representa a superfície do corpo (piso anterior, edifício e piso posterior) e "S₂" uma superfície localizada a grandes distâncias, ou seja, a fronteira externa do escoamento.

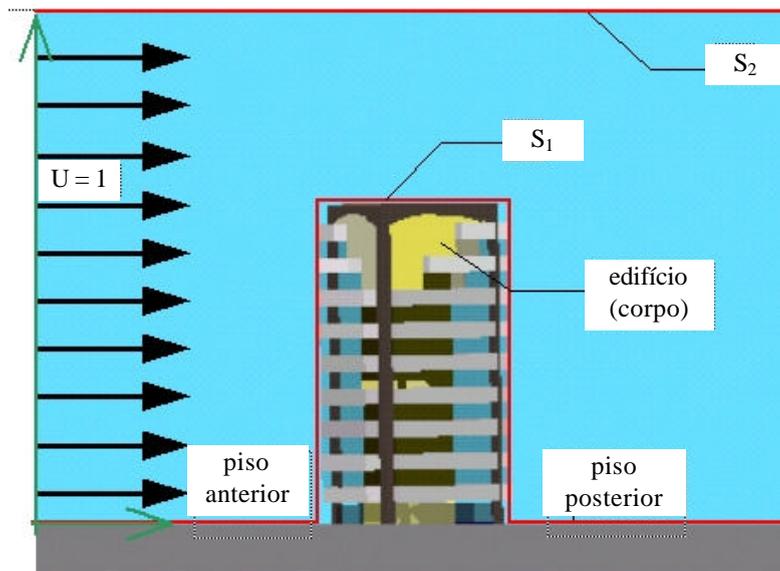


Figura 1. Definição da região fluida em torno de uma edificação.

Como pode ser observado nas Eq. (1) a (3), "S" define as fronteiras da região fluida, e "F1" e "F2" são funções escalares que definem a superfície do corpo - o edifício - e a fronteira nos limites do escoamento.

$$S = S_1 \oplus S_2 \quad (1)$$

$$S_1 : F_1(\bar{x}, t) = 0 \quad (2)$$

$$S_2 : F_2(\bar{x}, t) = 0 \quad (3)$$

Na superfície do corpo, definida como "S₁", especifica-se a condição de aderência, envolvendo a impenetrabilidade e o escorregamento nulo. A condição de impenetrabilidade afirma que a partícula de fluido não pode penetrar a superfície do corpo (transpor os contornos da edificação e a linha que delimita os pisos anterior e posterior), ficando a componente da velocidade do escoamento, normal à superfície, igual a zero. Esta condição é representada pela Eq. (4).

$$u_n = 0 \quad (4)$$

Com relação ao escorregamento nulo, a velocidade (\bar{u}) da partícula de fluido, em contato com a superfície, deve assumir a velocidade (\bar{v}) desta superfície, ou seja, a componente tangencial da velocidade do escoamento deve ser igual a zero. Esta condição é representada pela Eq. (5).

$$u_\tau = 0 \quad (5)$$

Uma outra condição ainda é imposta, e determina que na fronteira do escoamento, ou seja, em "S₂", o escoamento em estudo tende para o escoamento não perturbado, conforme mostra a Eq. (6).

$$|u| \rightarrow U, \quad r^* \rightarrow \infty \quad (6)$$

Na formulação do problema algumas hipóteses simplificadoras foram impostas, além da já mencionada consideração de escoamento bidimensional. Assume-se portanto, que o fluido em questão (ar) é newtoniano e homogêneo, que a região fluida é infinita e que o referido escoamento é incompressível, com perturbações ocasionadas exclusivamente pela presença do corpo.

Sendo o estudo realizado neste trabalho restrito ao escoamento de um fluido homogêneo, escoando de maneira incompressível, pode-se afirmar que a vorticidade, dada por $\nabla \times \bar{u} = \bar{\omega}$ só pode ser gerada no contorno da região fluida (Ricci, 2000). Entretanto, em toda essa região fluida devem ser verificados os princípios da conservação. Portanto, serão abordados dois desses princípios, ou seja, o princípio da Conservação de Massa, na forma da equação da Continuidade, representado pela Eq. (7) e, o princípio da Conservação da Quantidade de Movimento, na forma das equações de Navier-Stokes, representado pela Eq. (8).

$$\nabla^* \cdot \bar{u}^* = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}^*}{\partial t^*} + \bar{u}^* \cdot \nabla^* \bar{u}^* = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla^* p^* + \nu (\nabla^*)^2 \bar{u}^* \quad (8)$$

Na utilização da Eq. (8), a presença do termo "pressão" ocasiona uma dificuldade de resolução. Entretanto, a Eq. (7) e a Eq. (8) podem ser manipuladas, assumindo a forma da equação do transporte da vorticidade (Batchelor, 1967), representada pela Eq. (9).

$$\frac{D\bar{\omega}^*}{Dt^*} = \frac{\partial \bar{\omega}^*}{\partial t^*} + \bar{u}^* \cdot \nabla^* \bar{\omega}^* = \bar{\omega}^* \cdot \nabla^* \bar{u}^* + \nu (\nabla^*)^2 \bar{\omega}^* \quad (9)$$

Nesta equação, o termo $\bar{u}^* \cdot \nabla^* \bar{\omega}^*$ representa a taxa de variação da vorticidade devido à convecção do fluido, enquanto $\bar{\omega}^* \cdot \nabla^* \bar{u}^*$ representa a taxa de deformação das linhas de vórtices e existe apenas em escoamentos tridimensionais. O último termo da Eq. (9) representa a taxa de variação da vorticidade devido à difusão molecular de vorticidade.

Para escoamentos bidimensionais a Eq. (9) pode ser escrita em termos da vorticidade $\bar{\omega}$ (que agora é considerada uma grandeza escalar por possuir apenas uma componente), como a Eq. (10).

$$\frac{D\bar{\omega}^*}{Dt^*} = \frac{\partial \bar{\omega}^*}{\partial t^*} + \bar{u}^* \cdot \nabla^* \bar{\omega}^* = \nu (\nabla^*)^2 \bar{\omega}^* \quad (10)$$

Visando a simplificação e a generalização dos resultados, foi promovida a adimensionalização do problema em estudo (Ricci, 2000). Para tal, escolheu-se como comprimento característico a altura do edifício "b", como velocidade característica a velocidade incidente "U" e como tempo característico "b/U".

Desta forma, as Eq. (7), Eq. (8) e Eq. (10) foram reescritas como as Eq. (11), Eq. (12) e Eq. (13), respectivamente.

$$\text{Equação da continuidade} \quad \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (11)$$

$$\text{Equação de Navier-Stokes} \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \bar{u} \quad (12)$$

$$\text{Equação do transporte da vorticidade} \quad \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{\omega} = \frac{1}{Re} \nabla^2 \bar{\omega} \quad (13)$$

O problema formulado, tendo em vista sua complexidade, não apresenta solução analítica para as suas equações de governo, o que torna necessária a utilização de uma solução numérica. Dentre os métodos disponíveis, conforme citado anteriormente, foi adotado o Método de Vórtices (Hirata, 2000). Este método, essencialmente lagrangiano, utiliza uma nuvem de vórtices discretos para simular a evolução da vorticidade presente na região fluida e adota um algoritmo numérico que separa o fenômeno convectivo do fenômeno difusivo. A estrutura desse modelo é apresentada a seguir.

Observando a Eq. (13), verifica-se que os termos do lado esquerdo representam a variação temporal da vorticidade, descrevendo o processo de convecção da mesma, enquanto os termos do lado direito representam os efeitos da viscosidade, descrevendo a difusão da vorticidade. Desta forma, utiliza-se então, o algoritmo da separação da parte viscosa, inicialmente proposto por Chorin (1973) com o nome de Viscous Splitting Algorithm.

Segundo este algoritmo, num mesmo intervalo de tempo, a convecção da vorticidade é governada pela Eq.(14).

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \omega = 0 \quad (14)$$

Sendo a difusão governada pela Eq. (15).

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{1}{R_e} \nabla^2 \omega \quad (15)$$

A utilização deste algoritmo apresenta a vantagem de se poder calcular separadamente os fenômenos da convecção e da difusão da vorticidade.

Neste trabalho, a presença do corpo no escoamento é simulada pelo Método de Painéis (Katz e Plotkin, 1991), com fontes distribuídas e de densidades constantes.

A Fig. (2) ilustra o modelo utilizado, onde Z_g é o ponto de geração de vorticidade e Z_c é o ponto de controle situado no centro de cada painel, onde serão impostas as condições de contorno.

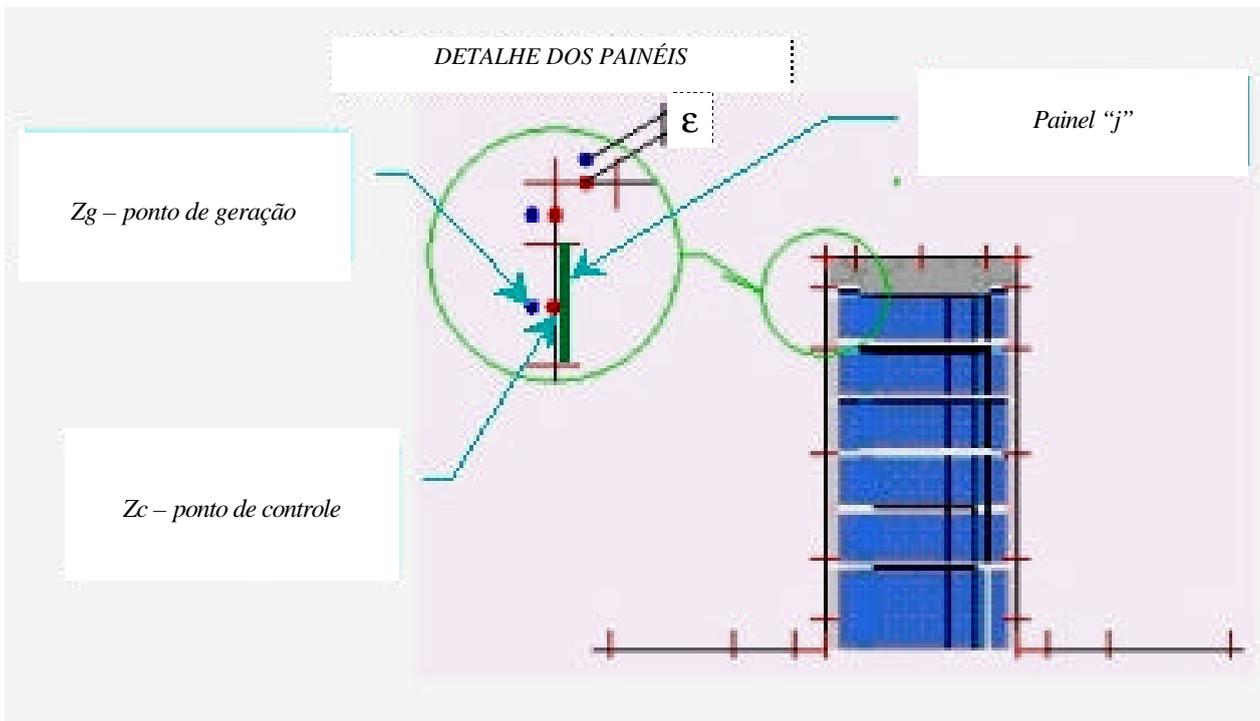


Figura 2. Utilização do Método de Painéis para simular a presença do corpo no escoamento.

Atendendo à condição de impenetrabilidade, as fontes induzem velocidade normal ao painel, igual e de sentido contrário à componente normal da velocidade induzida no mesmo painel por todos os elementos presentes no campo de escoamento. Para satisfazer a condição de escorregamento nulo, vórtices são gerados a uma pequena distância, ϵ , de cada “ponto de controle” de cada painel, sofrendo os processos de convecção e difusão. Estes vórtices induzem velocidade tangencial ao painel, igual à componente tangencial da velocidade induzida pelo campo de escoamento. A geração de vórtices próximos aos painéis dos pisos anterior e posterior, simula a presença da camada limite junto ao solo. A referida distância “ ϵ ” é definida como igual ao valor do Raio do Núcleo de um modelo de vórtice denominado Vórtice de Lamb, escolhido dentre outros modelos tais como vórtice Potencial, de Chorin e de Rankine.

A utilização do artifício de se incorporar um raio ao núcleo do vórtice tem a finalidade de fazer com que a distância entre o vórtice indutor, p , e o ponto de indução, q , não seja muito pequena ($Z_p \rightarrow Z_q$), para que a velocidade induzida não assuma valores muito grandes, não retratando o comportamento que ocorre na realidade.

O algoritmo mostrado na Fig. (3), ilustra o procedimento de resolução do problema através do Método de Vórtices, cujos detalhes podem ser obtidos em Hirata (2000), Ricci (2000) e Menezes (2001).

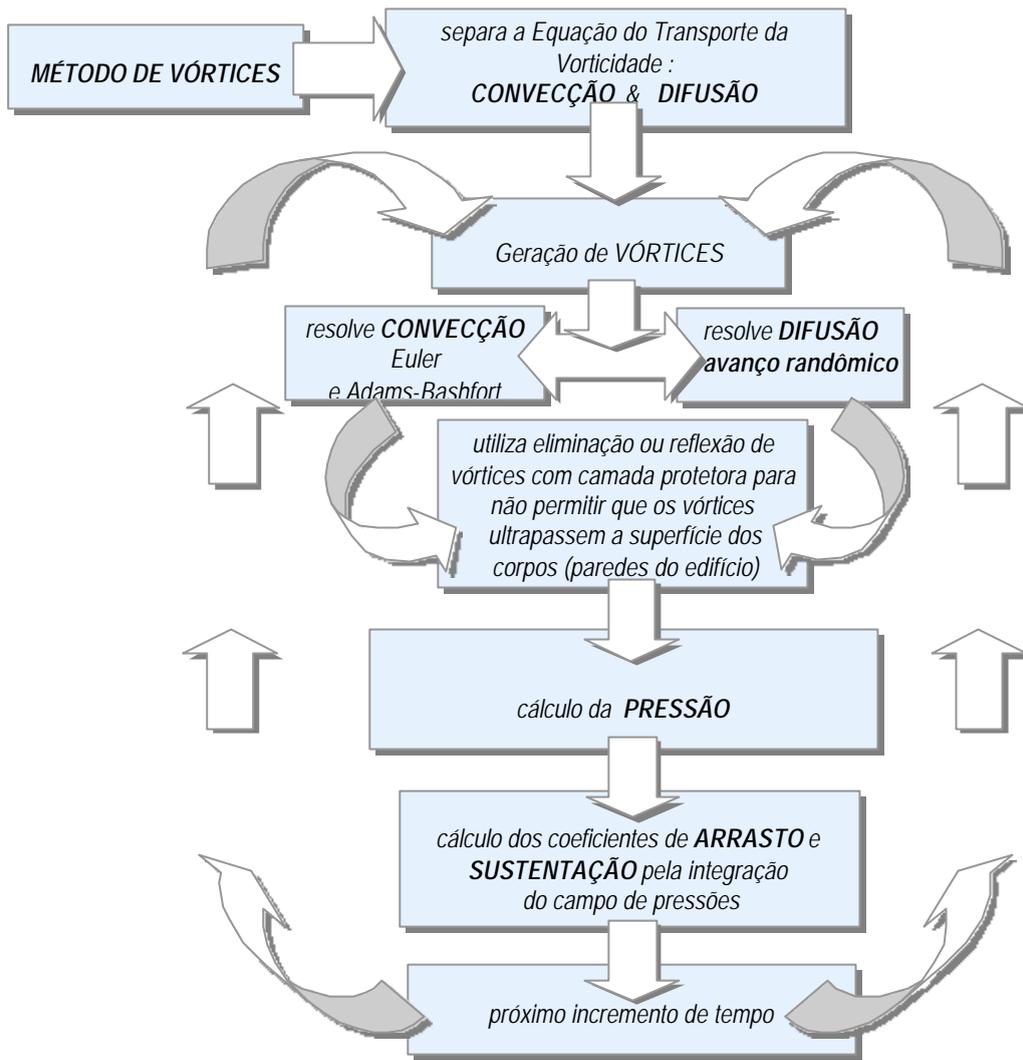


Figura 3. Fluxograma : Método de Vórtices.

3. Visualização da esteira de vórtices através de Realidade Virtual

Após a implementação numérica e obtidos os resultados, procede-se à visualização da esteira formada em torno das diferentes edificações estudadas. Para uma melhor compreensão de todo o processo ao longo do tempo, além de figuras e gráficos, foram construídos dois tipos de animações. O primeiro tipo consta da montagem seqüencial de quadros de figuras no formato "gif", e o segundo consta da visualização da esteira através de Realidade Virtual. O formato de armazenamento de imagens "gif" se caracteriza por empregar um máximo de 256 cores, podendo-se armazenar apenas as cores que serão utilizadas, reduzindo bastante o tamanho do arquivo.

Para que a simulação do escoamento, feita através de um programa (desenvolvido nesta pesquisa) escrito na linguagem Fortran 77, pudesse ser visualizada com as ferramentas de Realidade Virtual, foi necessário, inicialmente, que se modelasse os edifícios estudados. Essa modelagem foi feita escrevendo-se diretamente o código VRML (Virtual Reality Modeling Language – Linguagem Modeladora de Realidade Virtual) em um editor de textos. A Fig. (4) mostra parte do processo de montagem, através de primitivas geométricas, de um dos modelos de edificações.

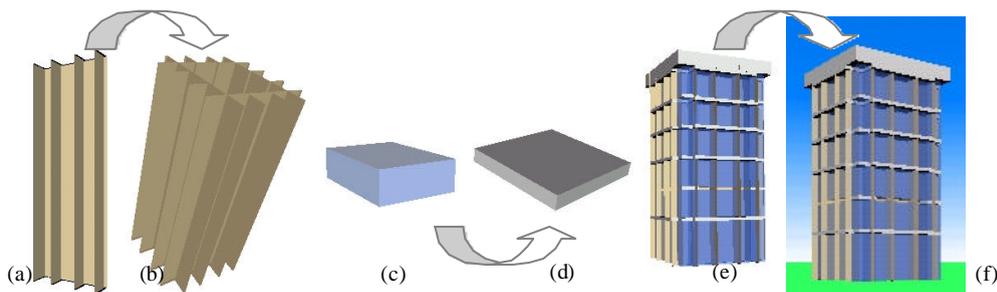


Figura 4. Utilização da segmentação do mundo virtual para representar o Edifício 1 em linguagem VRML.

(a) extrusao.wrl. (b) pilares.wrl. (c) pavtipo.wrl. (d) teto.wrl. (e) assembly.wrl. (f) edificio1.wrl.

Após a modelagem das edificações e com as coordenadas de todos os pontos da esteira de vórtices determinadas pelo programa Fortran desenvolvido nesta pesquisa (Menezes, 2001), tornou-se possível visualizar o escoamento em torno dos prédios em estudo. Para tal, foi desenvolvida uma sub-rotina no interior do referido software, capaz de gerar os arquivos de entrada, necessários para o programa "ConvertVRMLv4.for" (programa de conversão FORTRAN/VRML), também desenvolvido no decorrer desse trabalho. O referido programa lê as coordenadas dos vórtices da esteira e processa automaticamente o arquivo ".wrl" importando a geometria da edificação, modelada previamente. O arquivo, escrito na linguagem VRML (Ames et al, 1997), por sua vez, faz a animação gráfica, mostrando o movimento do escoamento em torno da edificação.

Para geração da animação gráfica em VRML, dentre as opções oferecidas por esta linguagem, utilizou-se sensores e interpoladores. Nestas animações, foi utilizado basicamente o sensor "TimeSensor", que gera automaticamente um evento a cada passo do relógio, e como interpolador, o "CoordinateInterpolator", definindo as "keyframes" da animação e interpolando por uma função linear. As posições chaves para cada instante de tempo, definidas para o interpolador, foram lidas a partir do já mencionado "ConvertVRMLv4.for".

Cabe mencionar ainda, que inicialmente utilizou-se o "node" de definição geométrica "Sphere" para que esferas representassem os vórtices da esteira estática. Posteriormente, esta representação foi feita através de pontos, com o "node PointSet", diminuindo assim, o tamanho do arquivo. Para a representação da esteira em movimento, inicialmente utilizou-se o "node Sphere", para representar os vórtices, em conjunto com o interpolador "PositionInterpolator", o que gerou um arquivo muito grande e de leitura muito lenta. Já com a utilização do "node PointSet" para representar os vórtices, em conjunto com o interpolador "CoordinateInterpolator" (Magalhães, 2001), este problema ficou praticamente resolvido.

A Figura (5) apresenta alguns quadros de imagens estáticas do escoamento em torno do modelo denominado Edifício 1. Nestas imagens, a esteira é representada através de pontos que representam as posições ocupadas pelos vórtices.



Figura 5. Alguns quadros de visualização da esteira de vórtices do Edifício 1. Visualização em VRML. (a) Iteração 10. (b) Iteração 20. (c) Iteração 80.

4. Análise dos resultados obtidos

Nas simulações realizadas, foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

Inicialmente, para que se pudesse validar o programa computacional, "Edifícios.for", desenvolvido nesta pesquisa e adaptado a partir da rotina "FontesVortices02.for" (Hirata, 2000), escrita na linguagem "FORTRAN 77", e que apresenta resultados compatíveis com os encontrados na literatura, para o caso de escoamentos em torno de um cilindro, foram analisados quatro tipos de configurações de edificações enumeradas a seguir.

"Edifício 1" com a altura, já na sua forma adimensionalizada, igual a 1 e a largura igual a 0,5, o que corresponde a uma razão de forma (altura dividida pela largura) igual a 2. "Edifício 2" com altura de 0,5 e largura igual a 1, sendo a razão de forma igual a 0,5. "Conjunto de Edifícios 3", constando de dois modelos semelhantes ao Edifício 1 separados por uma distância igual a uma vez a altura dos mesmos. "Conjunto de Edifícios 4", constando de dois modelos semelhantes ao Edifício 1 separados por uma distância igual a três vezes a altura dos mesmos. Foram utilizados, nestes casos, dados do estudo numérico de Bobenrieth (2000), feito através do Método dos Volumes Finitos. Nas quatro simulações, o referido autor utilizou um Número de Reynolds igual a $3,19 \times 10^8$ e a velocidade do escoamento incidente

foi de 50 m/s com ângulo de ataque igual a 0° . Após as simulações dos casos disponíveis na literatura, os quatro modelos de edifícios estudados, além de uma edificação com base alargada e outra sobre pilotis, foram então simulados para um número de Reynolds de $5,0 \times 10^6$, obtido para edificações de 16 metros de altura, sob a incidência de vento a uma velocidade de 4,9 m/s, compatível com a encontrada na cidade de Natal. O ângulo de incidência do escoamento, como nas quatro simulações anteriores, foi de 0° . Para escoamentos em planta baixa, três modelos foram utilizados (Modelo 1, seção transversal com arestas vivas; Modelo 2, seção transversal com arestas chanfradas; Modelo 3, seção transversal com arestas abauladas). Nestas simulações foi utilizado um número de Reynolds menor que os anteriores, e igual a $1,0 \times 10^5$. O ângulo de incidência do escoamento continuou sendo igual a 0° .

A Figura (6) mostra a representação temporal do coeficiente de arrasto para os modelos simulados utilizando-se um número de Reynolds de $5,0 \times 10^6$, a Fig. (7) apresenta esses coeficientes para os modelos simulados com um Reynolds de $1,0 \times 10^5$.

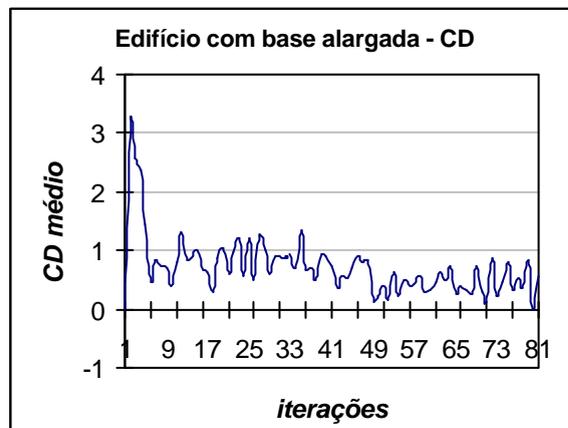
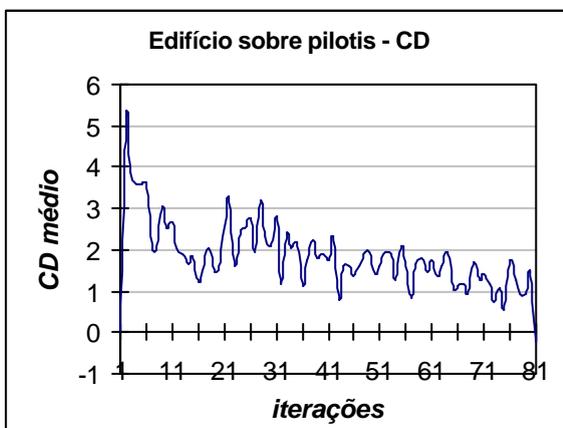
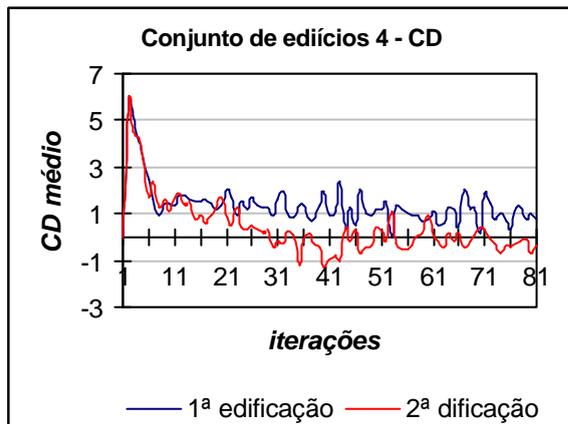
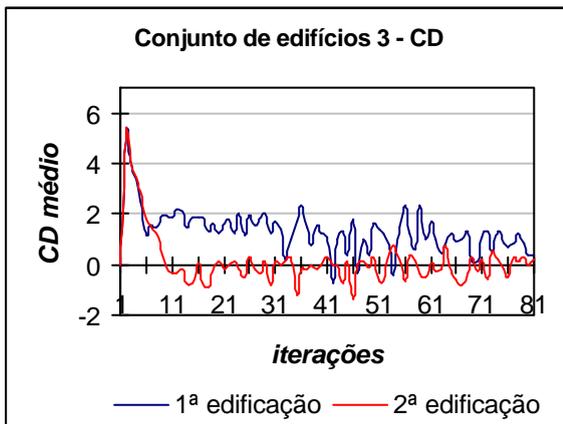
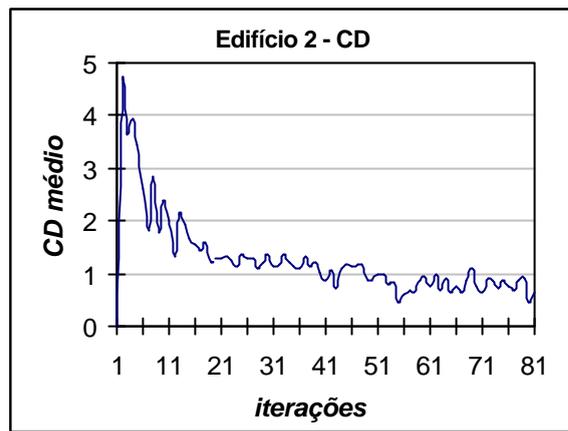
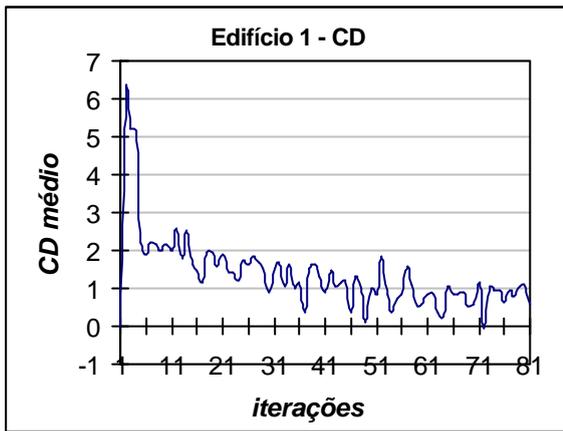


Figura 6. Representação da distribuição temporal do coeficiente de arrasto para os modelos simulados em corte, denominados Edifício 1, Edifício 2, Edifício 3, Edifício 4, Edifício sobre pilotis e Edifício com base alargada, após 80 iterações, com incremento de tempo igual a 0,18. Número de Reynolds igual a $5,00 \times 10^6$.

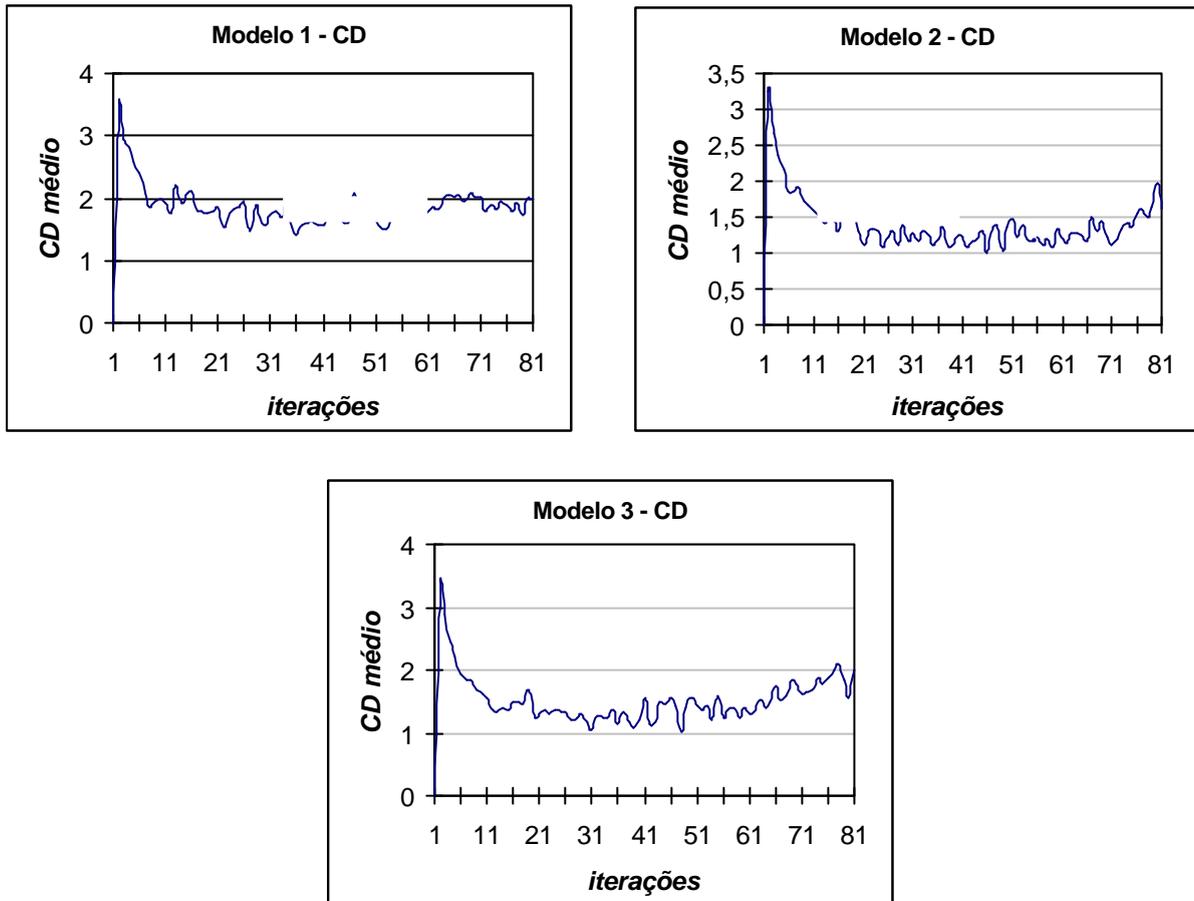


Figura 7. Representação da distribuição temporal do coeficiente de arrasto para os modelos simulados em planta baixa, denominados Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3, após 80 iterações, com incremento de tempo igual a 0,18. Número de Reynolds igual a $1,00 \times 10^5$.

A Figura (8) e a Fig. (9) apresentam, através de imagens produzidas em Realidade Virtual, quadros da animação para os modelos estudados em corte, simulados para um número de Reynolds de 5×10^6 , após 80 iterações. Verifica-se nestas imagens, que a esteira é representada através de linhas de trajetória, plotadas a partir da interligação dos pontos ocupados pelas diferentes coordenadas dos vórtices ao longo do tempo.

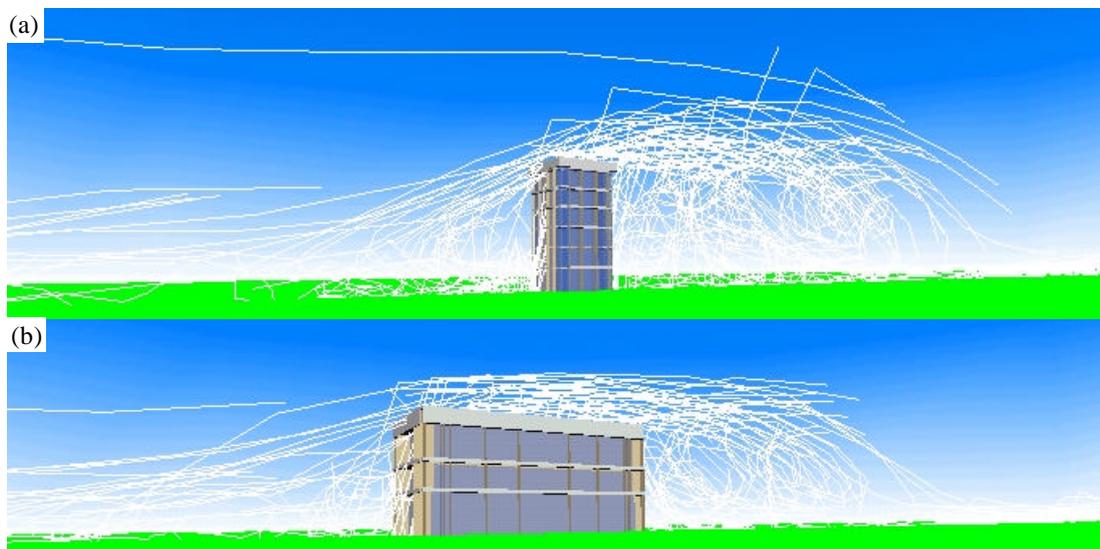


Figura 8. Representação através de Realidade Virtual das esteiras obtidas em simulação feita com o Método de Vórtices, após 80 iterações. Número de Reynolds igual a $5,00 \times 10^6$. (a) Edifício 1. (b) Edifício 2.

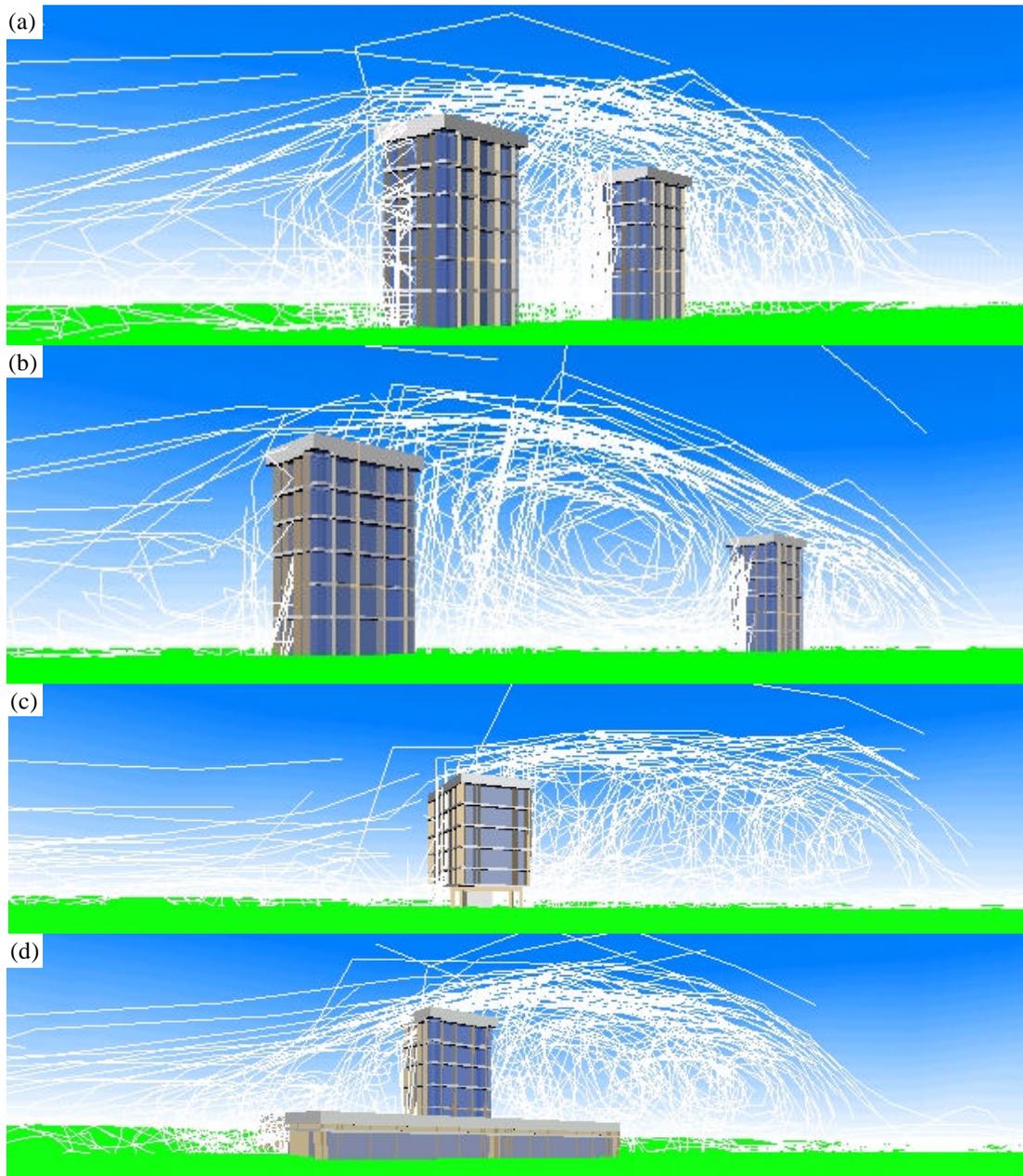


Figura 9. Representação através de Realidade Virtual das esteiras obtidas em simulação feita com o Método de Vórtices, após 80 iterações. Número de Reynolds igual a $5,00 \times 10^6$. (a) Edifício 3. (b) Edifício 4. (c) Edifício sobre pilotis. (d) Edifício com base alargada.

A Fig. (10) e a Fig. (11) mostram a esteira produzida em torno dos modelos estudados em planta baixa, simulados para um número de Reynolds de 1×10^5 , após 80 iterações.

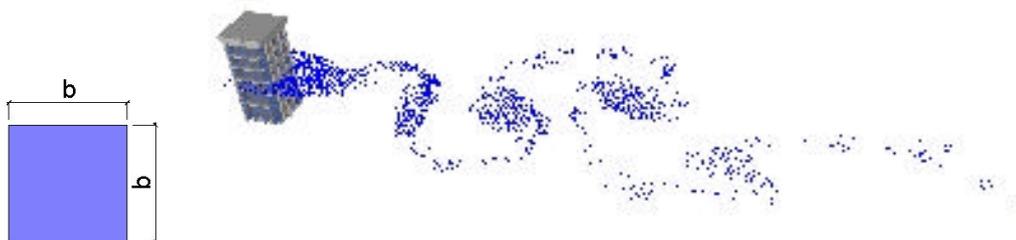


Figura 10. Representação das esteiras obtidas em simulação feita com o Método de Vórtices, após 80 iterações. Número de Reynolds igual a $1,00 \times 10^5$. Modelo 1 - arestas vivas.

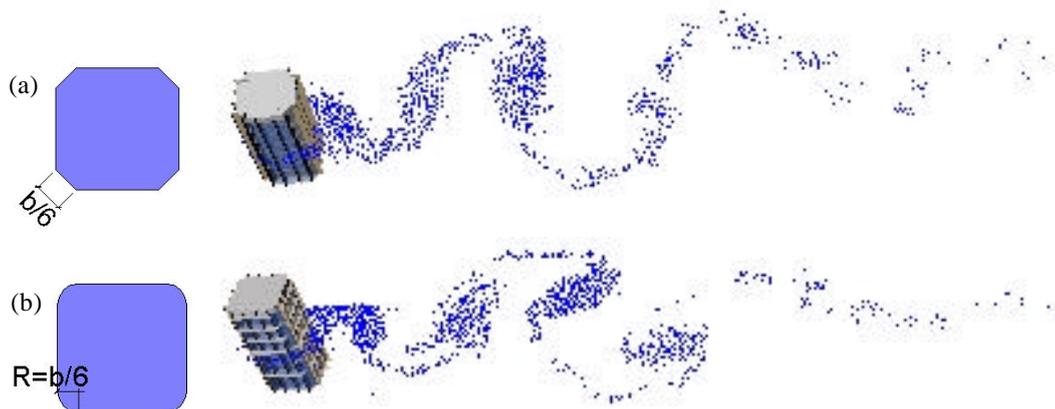


Figura 11. Representação das esteiras obtidas em simulação feita com o Método de Vórtices, após 80 iterações. Número de Reynolds igual a $1,00 \times 10^5$. (a) Modelo 2 - arestas chanfradas. (b) Modelo 3 - arestas abauladas.

Para análise dos resultados numéricos, a Tab. (1) foi elaborada, fazendo-se a comparação com os valores encontrados na literatura.

Tabela 1. Coeficientes de arrasto obtidos neste estudo após 80 iterações .

Edificação	Resultado na literatura		Este trabalho $Re= 3,19 \times 10^8$		Este trabalho $Re= 5,0 \times 10^6$		Este trabalho $Re= 1,0 \times 10^5$	n° de vórtices (este trabalho)
	Cd 1°	Cd 2°	Cd 1°	Cd 2°	Cd 1°	Cd 2°	Cd	
	prédio	prédio	prédio	prédio	prédio	prédio		
Edifício1	*1,79	---	1,38	---	1,39	---	---	14640
Edifício2	*1,68	---	1,35	---	1,28	---	---	13280
Edifício3	*1,34	*- 2,0	1,38	0,10	1,35	0,12	---	20320
Edifício4	*1,57	*- 1,07	1,35	0,31	1,38	0,41	---	18800
E. pilotis	---	---	---	---	1,87	---	---	16400
E. base	---	---	---	---	0,72	---	---	16016
Modelo 1	**2,0	---	---	---	---	---	1,9	1096
Modelo 2	**1,3	---	---	---	---	---	1,3	1071
Modelo 3	**1,1	---	---	---	---	---	1,2	668

*Bobenrieth et al (2000) com $Re=3,19 \times 10^8$; **Tamura e Miyagi (1999) com $Re=3,0 \times 10^4$

5. Conclusões

- Referindo-se ao formato das esteiras, foram encontrados os resultados esperados, de acordo com os estudos de comparação.
- Com referência aos coeficientes de arrasto médios, os resultados encontrados nas simulações dos Edifícios 1 e 2 indicaram valores proporcionais aos valores da razão de forma, ou seja, à medida que a razão de forma aumenta, os referidos coeficientes de arrasto também aumentam.
- Para o estudo do efeito da proximidade das edificações, o Conjunto de Edifícios 3 e o Conjunto de Edifícios 4, alcançaram também os resultados esperados. O efeito da segunda edificação sobre a primeira é de reduzir o coeficiente de arrasto médio. O efeito da primeira edificação sobre a segunda, é de também diminuir significativamente esses coeficientes de arrasto.
- Conclui-se ainda, que a não utilização de uma modelagem da turbulência nas simulações feitas no presente trabalho pode ter ocasionado a diferença quantitativa com os resultados de comparação (conforme a tabela anterior, para velocidades do escoamento mais baixas os resultados se aproximam mais do estudo de comparação), além do que, os estudos foram realizados sob condições diferentes, quanto ao método numérico, e principalmente quanto ao tempo de simulação.
- Embora nenhum resultado experimental ou numérico tenha sido encontrado na literatura pesquisada, tanto para edifícios sobre pilotis, como para edificações com base alargada, em ambos os casos, Blessmann (1989) faz

alguns comentários que levam à conclusão de que os resultados obtidos pelo presente estudo foram satisfatórios.

Referindo-se a edificações sobre pilotis, o referido autor menciona que a velocidade do escoamento aumenta no pavimento térreo (aberto), e que pode ser de tal valor, a torná-lo inadequado para utilização. Portanto, o aumento do coeficiente de arrasto desta edificação ($C_d = 1,87$), com relação ao prédio isolado e compacto ($C_d = 1,39$), no ensaio que utilizou o Reynolds de $5,0 \times 10^6$, foi considerado coerente.

Com relação ao edifício com base alargada, Blessmann (1989), sugere a utilização desse formato para evitar as altas velocidades junto ao terreno, o que está de acordo com o valor do coeficiente de arrasto que, para esta situação, decresceu para 0,72.

- Quanto aos modelos simulados em planta baixa ($Re = 1,0 \times 10^5$), ficaram plenamente de acordo, quantitativa e qualitativamente, com os resultados encontrados na literatura ($Re = 3,0 \times 10^4$). Os coeficientes de arrasto da edificação com arestas vivas foram atenuados quando estas arestas estavam chanfradas, e esta diminuição foi ainda maior com as referidas arestas abauladas. Nestes casos, foram utilizadas velocidades de escoamento menores que as dos edifícios representados em corte, o que mais uma vez pode indicar a necessidade de se utilizar a modelagem da turbulência em escoamentos a altos números de Reynolds. Além disso, o programa utilizado, e que pelo conhecimento da localização dos pontos de estagnação fazia uso da eliminação de vórtices, já estava bastante validado para o caso de formas cilíndricas, mostrando agora, eficiência em formas quadrangulares.
- Devido a limitações do hardware disponível, e pela geração de um grande número de vórtices, que tornava o processamento computacional lento após muitas iterações, as simulações foram realizadas até o passo de número 80. Seria desejável, entretanto, um número bem maior de passos no tempo para a avaliação do comportamento da esteira. Em apenas duas simulações conseguiu-se atingir as 120 iterações. Foi o caso do Edifício 1, com a geração de 26760 vórtices e do Edifício 2, com 24720 vórtices. Em ambas as situações, o tempo de processamento excedeu 24 horas.
- Quanto à utilização da Realidade Virtual para visualizar graficamente a esteira, foi considerada satisfatória. Para visualização de quadros estáticos, mostrou-se bastante eficiente, inclusive conseguindo exibir um número de vórtices bastante elevado.
- Com relação às animações gráficas em Realidade Virtual, a utilização de linhas interligando as posições ocupadas pelos vórtices ao longo do tempo, mostrou bons resultados. Os vórtices foram plotados de 50 em 50 posições, diminuindo o tamanho do arquivo e as linhas proporcionaram uma melhor compreensão da forma da esteira, o que não acontecia com o uso da representação por pontos. Uma melhor representação das linhas de trajetória seria obtida se os trechos retos fossem representados por "Splines", entretanto a interpolação feita na linguagem VRML, versão 2.0, não possibilita esta opção.

Sob um aspecto geral, e com base na análise dos resultados obtidos, conclui-se que o objetivo deste trabalho foi alcançado, ou seja, foram simulados escoamentos em torno de diferentes edificações, através do Método de Vórtices, e calculados os coeficientes de arrasto, obtendo-se a visualização das esteiras formadas, através de realidade virtual, que nesta situação, mostrou ser uma ferramenta bastante eficiente.

6. Agradecimentos

O autor principal agradece ao CNPq pela ajuda financeira na forma de bolsa de estudos durante esta pesquisa.

7. Referências

- Ames, A. L. ; Nadeau, D. R. ; Moreland, J. L. ,1997, "VRML 2.0 Sourcebook" , John Wiley & Sons, New York, USA, 639p.
- Batchelor, G. K., 1953, "The Theory of Homogeneous Turbulence", Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.
- Blessmann, J., 1989, "Ação do vento em edifícios", Série Engenharia Estrutural, v.7. Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Bobenrieth, R. F. M.; Falcão, A. F. M.; Mol, J. M. D. , 2000, "Simulação numérica das forças devidas ao vento em edificações : efeito da sombra aerodinâmica em geometrias bidimensionais", Proceedings of the Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, Brasil.
- Breuer, M.; Bernsdorf, J.; Zeiser, T.; Durst, F. , 2000, "Accurate computations of the laminar flow past a square cylinder based on two different methods: lattice-Boltzmann and finite-volume", International Journal of Heat and Fluid Flow, v.21, p.186-196.
- Chorin, A. J. , 1973, "Numerical study of slightly viscous flow", Journal of Fluid Mechanics, v.57, p.785-796.
- Ferreira, A. D., 1999, "Simulação Numérica e Experimental de Escoamentos Turbulentos em Torno de Obstáculos. Coimbra, Portugal" , Tese (Doutorado), Faculdade de Ciências e Tecnologia , Departamento de Engenharia Mecânica , Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 318p.
- Hirata, M. H., 2000, "O Método de Vórtices com modelagem da turbulência", Proceedings of the Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, Brasil.

- Katz, J.; Plotkin, A. , 1991, "Low speed aerodynamics: from wing theory to panel methods", . McGraw Hill, Inc.
- Magalhães, L. P. , 2001, Private Communicaton, Online Tutorial. [http:// www.dca.fee.unicamp.Br /~ leopini /tut-vrml/vrml-tut.html](http://www.dca.fee.unicamp.br/~leopini/tut-vrml/vrml-tut.html) .
- Martinuzzi, R.; Tropea, C. , 1993, "The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow", Journal of Fluids Engineering , v.115, p.85-92.
- Menezes, G. L. B. B. , 2001, "Simulação numérica do escoamento em torno de edifícios através do Método de Vórtices com visualização gráfica em Realidade Virtual", Dissertação (Mestrado), DEM , Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil , 147p.
- Murakami, S., Ooka, R.; Mochida, A.; Yoshida, S.; Kim, S. , 1999, "CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.81, p.57-81.
- Ricci, J. E. R. , 2000, Private Communication, EFEI.
- Tamura, T.; Miyagi, T. , 1999, "The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.83, p.135-145.

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AROUND BUILDINGS THROUGH VORTEX METHOD WITH GRAPHIC VISUALIZATION IN VIRTUAL REALITY

Gilda Lúcia Bakker Batista de Menezes

UFRN - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal - RN - Brasil - cep. 59072-970
gildamenezes@uol.com.br

Zenaide Alves de Araújo

UFRN - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal - RN - Brasil - cep. 59072-970
zenaide@dem.ufrn.br

Ângelo Roncalli Oliveira Guerra

UFRN - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Campus Universitário - Lagoa Nova - Natal - RN - Brasil - cep. 59072-970
angelo@reitoria.ufrn.br

***Abstract.** This work reports the simulation of the wind flow around buildings, and its primary goal is the characterization of the flow field to structural or pedestrian confort studies. The Reynolds Number is of the power of 10⁶. Due to the three-dimensional problem complexity, flow sections have been studied, turning, this analysis, two-dimensional. The buildings are simulated by using the Panels Method with distributed sources. On the other hand, the flow, considered to be incompressible, is simulated through the Vortex Method, that uses a Lagrangian description of the flow field. The Lamb vortex approach was considered over the whole surface of the bodies and the set of vortex is under convection action following a scheme that uses the Euler equations, first-order time-marching, and Adams-Bashforth, second-order time-marching. The vortex diffusion is made by the Random Walk Method. The drag coefficients are calculated by pressure gradient integration. The simulation makes use of a previously published and reliable computer code as its background. The former computer code has been exhaustively tested for the case of an isolated circular cylinder. The obtained results show good accordance with the results found in the literature and have been modeled through Virtual Reality, used in this situation, as one more option of graphic visualization tool.*

Keywords : Vortex Method; incompressible flow; aerodynamic forces ; buildings; Virtual Reality.