

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

André Francesconi Pinto Ribeiro

**ANÁLISE AERODINÂMICA DE UM EDIFÍCIO POR
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Porto Alegre
dezembro 2009

ANDRÉ FRANCESCONI PINTO RIBEIRO

**ANÁLISE AERODINÂMICA DE UM EDIFÍCIO POR
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Armando Miguel Awruch
Coorientadora: Adriane Prisco Petry

Porto Alegre
dezembro 2009

ANDRÉ FRANCESCONI PINTO RIBEIRO

**ANÁLISE AERODINÂMICA DE UM EDIFÍCIO POR
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2009

Prof. Armando Miguel Awruch
Dr. pela UFRJ
Orientador

Prof.^a Adriane Prisco Petry
Dra. pela UFRGS
Coorientadora

Prof.^a Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Armando Miguel Awruch
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof.^a Adriane Prisco Petry
Dra. pela UFRGS

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

Prof. João Ricardo Masuero
Dr. pela UFRGS

De todas as pessoas que conheço, apenas uma teve a paciência de me escutar ao longo de um ano sobre um trabalho que ninguém entendia.
Fico feliz que tenha sido a Luciana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Armando Miguel Awruch, orientador deste trabalho, por ter me introduzido à Dinâmica dos Fluidos Computacional, nas aulas de Elementos Finitos, em 2007.

Agradeço ao Prof. Luca Bruno, do *Politecnico di Torino*, que me ensinou tanto sobre o tema aqui tratado, mesmo eu sendo um aluno estrangeiro e de um curso que normalmente não participa de suas aulas.

Agradeço à Prof.^a Adriane Prisco Petry, coorientadora deste trabalho, pelas longas conversas, recomendações e por não hesitar em ajudar um aluno de outro curso.

Agradeço à Prof.^a Carin Maria Schmitt, pela incansável dedicação à melhoria dos Trabalhos de Diplomação da Engenharia Civil.

Agradeço ao Centro Nacional de Supercomputação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde as simulações deste trabalho foram realizadas. Em especial, ao colega Marco Lovatto, pelo valioso auxílio nas instalações.

Agradeço aos meus pais, Jorge e Cora, por todas as oportunidades que me ofereceram ao longo da minha vida, me forçando sempre a mirar alto, e pelo exemplo que me passaram desde o início.

Agradeço aos amigos que estiveram comigo durante a minha formação.

Não se preocupe muito com as suas dificuldades em
Matemática, posso assegurar-lhe que as minhas são ainda
maiores.

Albert Einstein

RESUMO

RIBEIRO, A. F. P. **Análise Aerodinâmica de um Edifício por Dinâmica dos Fluidos Computacional**. 2009. 76 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho visa realizar a análise aerodinâmica de um edifício, por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), com o intuito de averiguar a precisão dos resultados obtidos em comparação aos gerados por medições em escala real. A CFD é uma área em desenvolvimento e que a cada dia está ganhando mais espaço na Engenharia do Vento. Inicialmente, são apresentadas as equações de conservação a serem resolvidas, bem como o Método dos Volumes Finitos para solução numérica das mesmas. Diversos métodos numéricos são apresentados, incluindo, sempre que possível, suas vantagens, limitações e áreas de aplicação. Modelos de turbulência são introduzidos, bem como as limitações e vantagens deles. O edifício a ser calculado foi construído e instrumentado pela Universidade Texas Tech, nos Estados Unidos, a fim de gerar resultados em escala real e permitir que estudos comparativos, experimentais e numéricos, possam ser realizados. O número de Reynolds em função da altura do edifício é de $2,35 \times 10^6$. Os passos tomados para a realização das simulações estão descritos em detalhes, seguindo recomendações descritas na literatura. Foram feitos estudos paramétricos, visando a determinação das condições de contorno ideais. Uma análise de independência de malhas é feita para o caso permanente, usando a extrapolação de Richardson. Análises transientes são realizadas, com escoamento na entrada laminar e com geração de turbulência a partir de um método numérico. Os resultados obtidos com as simulações permanentes usando o modelo k- ϵ RNG se mostraram adequados e os coeficientes de pressão médios calculados foram muito próximos aos medidos em escala real. Foram realizadas análises transientes utilizando simulações de grandes escalas e o modelo de Smagorinsky. O desvio padrão do coeficiente de pressão se mostrou fortemente dependente de flutuações na velocidade na entrada do domínio. Limitações de tempo não permitiram estudos aprofundados de métodos para geração de turbulência na entrada. Estudos adicionais são sugeridos para realizá-los.

Palavras-chave: Engenharia do Vento Computacional; equações médias de Reynolds; simulação de grandes escalas.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: fluxograma da realização do trabalho | 20 |
| Figura 2: volumes de controle com pontos centrais e de interpolação | 27 |
| Figura 3: edifício da Texas Tech com os medidores de pressão na linha média..... | 46 |
| Figura 4: detalhe da <i>O-Grid</i> | 49 |
| Figura 5: detalhe da malha mista..... | 50 |
| Figura 6: detalhe da malha com grande razão de aspecto | 51 |
| Figura 7: dimensões do domínio em função da altura do edifício..... | 52 |
| Figura 8: divisão da malha para o processamento em paralelo | 58 |
| Figura 9: malha usada com LES..... | 61 |
| Figura 10: perfis de velocidade na entrada (linha cheia) e após 3H (linha tracejada)..... | 65 |
| Figura 11: comparação dos coeficientes de pressão médios na linha central do edifício | 66 |
| Figura 12: andamento do coeficiente de arrasto do edifício em função do tempo..... | 67 |
| Figura 13: comparação do desvio padrão dos coeficientes de pressão na linha central do edifício..... | 68 |
| Figura 14: comparação do desvio padrão dos coeficientes de pressão na linha central do edifício com geração de turbulência na entrada do domínio..... | 69 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1: comparação das discretizações e do tempo de processamento para RANS, LES e DNS para o caso estudado..... | 64 |
|--|----|

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área (m^2)

C_p = coeficiente de pressão

C_s = constante de Smagorinsky

C_s = constante de rugosidade (0,5, por *default*)

C_μ = constante (0,085)

$C_{\varepsilon 1}$ = constante (1,42)

$\hat{C}_{\varepsilon 2}$ = constante (1,68)

I_u = intensidade de turbulência da componente \mathbf{u} (%)

k = energia cinética turbulenta (m^2/s^2)

k_s = rugosidade equivalente de grão de areia

L = comprimento característico do escoamento (m)

L_u = escala de comprimento da turbulência da componente \mathbf{u} (m)

\mathbf{n} = vetor para fora ortogonal à superfície de um volume de controle

p = pressão (Pa)

p_k = ordem do erro de discretização

Re = número de Reynolds

r_k = razão entre número de volumes em uma direção de duas malhas

R_k = razão entre os erros de discretização

S_{ij} = tensor de taxa de deformação

t = tempo (s)

u = componente cartesiana da velocidade do vento na direção \mathbf{x} (m/s)

\mathbf{U} = vetor com as componentes de velocidade \mathbf{u} , \mathbf{v} e \mathbf{w} (m/s)

u_τ = velocidade de fricção, função da massa específica e tensão na parede (m/s)

v = componente cartesiana da velocidade do vento na direção \mathbf{y} (m/s)

w = componente cartesiana da velocidade do vento na direção \mathbf{z} (m/s)

x = coordenada cartesiana (m)

y = coordenada cartesiana (m)

y^* = distância adimensional da parede

y^+ = distância adimensional da parede

y_p = distância do ponto \mathbf{P} à parede (m)

z = coordenada cartesiana (m)

z_0 = rugosidade aerodinâmica do terreno

β = constante (0,012)

Δ_f = tamanho do filtro, tomado como a raiz cúbica do volume da célula (m)

δ_{ij} = função Delta de Kronecker (1 se $i = j$, 0 se $i \neq j$)

Δn_i = vetor para fora da superfície discreta (m^2)

Δt = passo de tempo (s)

Δx = tamanho da malha (m)

ε = taxa de dissipação da energia cinética (m^2/s^3)

η = escala de comprimento de Kolmogorov

κ = constante de Karman (aproximadamente 0,4).

λ_0 = constante (4,38)

μ = viscosidade dinâmica do fluido ($1,86 \times 10^{-5}$ kg/m.s para o ar a $25^\circ C$)

μ_t = viscosidade turbulenta dos vórtices SGS (m^2/s)

ν = viscosidade cinemática do fluido (μ/ρ , m^2/s)

ν_T = viscosidade turbulenta (m^2/s)

ρ = massa específica do fluido ($1,184$ kg/ m^3 para o ar a $25^\circ C$)

σ_k = constante (0,72)

σ_ε = constante (0,72)

τ_{ij}^s = tensão de Reynolds de escala submalha (kg/m.s²)

φ = variável genérica

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 MÉTODO DE PESQUISA | 16 |
| 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA | 16 |
| 2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO | 16 |
| 2.2.1 Objetivo principal..... | 16 |
| 2.2.2 Objetivos secundários | 16 |
| 2.3 PRESSUPOSTOS..... | 17 |
| 2.4 PREMISSAS | 17 |
| 2.5 DELIMITAÇÕES..... | 17 |
| 2.6 LIMITAÇÕES | 18 |
| 2.6 DELINEAMENTO..... | 19 |
| 3 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO | 22 |
| 3.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO | 22 |
| 3.2 O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS | 24 |
| 3.3 FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO | 26 |
| 3.3.1 Esquema <i>Upwind</i> de primeira ordem | 27 |
| 3.3.2 Esquema de Diferenças Centrais | 27 |
| 3.3.3 Esquema <i>Upwind</i> Quadrático | 28 |
| 3.4 PROBLEMAS TRANSIENTES | 29 |
| 3.4.1 Discretização de Primeira Ordem..... | 29 |
| 3.4.2 Discretização de Segunda Ordem | 29 |
| 3.5 ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE | 30 |
| 3.5.1 Método SIMPLE..... | 30 |
| 3.5.2 Método PISO..... | 31 |
| 4 MÉTODOS PARA LIDAR COM A TURBULÊNCIA | 33 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | MODELAGEM DA TURBULÊNCIA | 34 |
| 4.1.1 | Simulação Direta da Turbulência | 34 |
| 4.1.2 | Equações Médias de Reynolds e o modelo k- ϵ RNG | 36 |
| 4.1.3 | Simulação de Grandes Escalas | 39 |
| 4.2 | RECOMENDAÇÕES PARA A DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO | 42 |
| 4.2.1 | Tratamento de paredes | 42 |
| 4.2.2 | Escolha do passo de tempo..... | 43 |
| 4.3 | CONFIABILIDADE | 44 |
| 5 | CASO DE ESTUDO: O EDIFÍCIO DA TEXAS TECH | 46 |
| 5.1 | GERAÇÃO DA MALHA | 47 |
| 5.1.1 | Avaliação da altura dos volumes adjacentes ao edifício | 48 |
| 5.1.2 | Malha do tipo <i>O-Grid</i> | 49 |
| 5.1.3 | Malha hexaédrica regular | 49 |
| 5.1.4 | Malha mista..... | 50 |
| 5.1.5 | Malha hexaédrica alongada..... | 51 |
| 5.1.6 | Dimensões do domínio de cálculo..... | 52 |
| 5.2 | CONDIÇÕES DE CONTORNO..... | 52 |
| 5.2.1 | Entrada..... | 52 |
| 5.2.2 | Topo | 55 |
| 5.2.3 | Fundo e edifício..... | 56 |
| 5.2.4 | Demais condições de contorno..... | 56 |
| 5.3 | MÉTODOS NUMÉRICOS E DETALHES DO PROCESSAMENTO | 57 |
| 5.4 | VERIFICAÇÃO DA MALHA: EXTRAPOLAÇÃO DE RICHARDSON | 58 |
| 5.5 | SIMULAÇÃO TRANSIENTE..... | 60 |
| 5.5.1 | Modificação da malha | 60 |
| 5.5.2 | Geração de turbulência na entrada | 61 |
| 5.5.3 | Análise do passo de tempo | 62 |

| | |
|---|-----------|
| 5.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS FORMAS DE MODELAGEM | 63 |
| 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 65 |
| 6.1 SIMULAÇÕES PERMANENTES..... | 65 |
| 6.1.1 Perfil de velocidades | 65 |
| 6.1.2 Coeficientes de pressão médios..... | 66 |
| 6.2 SIMULAÇÕES TRANSIENTES..... | 67 |
| 6.2.1 Andamento dos coeficientes de força globais..... | 67 |
| 6.2.2 Desvio padrão dos coeficientes de pressão | 68 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 70 |
| REFERÊNCIAS | 72 |

1 INTRODUÇÃO

As construções civis estão sujeitas a cargas de diversas naturezas e de diferentes níveis de complexidade. O peso próprio de um viaduto pode ser calculado com grande precisão, visto que só depende dos materiais usados e da sua geometria, ambos os parâmetros bem definidos no projeto. Cargas estáticas verticais devido a pedestres em uma passarela podem ser estimadas levando em conta o número de pessoas por metro quadrado em uma multidão e o peso médio das mesmas. Cargas aerodinâmicas, por serem ligadas a um evento aleatório, são avaliadas por levantamentos estatísticos de velocidade e direção do vento em uma região e são aplicadas a obras específicas levando em conta fatores locais como a topografia, obstáculos próximos à construção e a geometria da estrutura.

Assim, a determinação das cargas aerodinâmicas claramente apresenta um grau maior de dificuldade, visto que estas dependem de muitas variáveis de níveis de complexidade diferentes para serem calculadas. Algumas podem ser determinadas de forma relativamente simples, pois as normas fornecem aos engenheiros os valores que devem ser usados, como no caso da velocidade do vento de uma certa região. Outras, como a topografia e a presença de obstáculos, são aproximadas por coeficientes também presentes nas mesmas normas que estimam os efeitos que estas variáveis provocam nos resultados finais.

A maior dificuldade, neste caso, está na geometria da estrutura. As normas nacionais e internacionais de cargas de vento em obras civis cobrem apenas casos muito simples de edifícios, torres e pontes. Tendo em vista que a forma dos mesmos pode ser tão complexa quanto o projetista desejar, é impossível cobrir todas as opções. Se a forma desejada não estiver presente nas normas, o que acontece frequentemente, e havendo necessidade de precisão das cargas devidas ao vento, a aplicação de ensaios experimentais em túneis de vento, cujo funcionamento é explicado por Loredou-Souza et al. (2004), realizados por profissionais da Engenharia do Vento, é a alternativa mais procurada hoje em dia. Isto pode mudar em breve pois, com o desenvolvimento de computadores cada vez mais potentes, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) começa a se tornar viável, com potencial para se converter em uma poderosa ferramenta para engenheiros nos próximos anos, em uma nova área chamada Engenharia do Vento Computacional.

Algumas das vantagens da simulação numérica de escoamentos são citadas por Kundu e Cohen (2002, p. 379-380), destacando-se as seguintes:

- a) produz resultados rapidamente e de forma econômica. Enquanto o preço da maior parte dos produtos aumenta, custos computacionais diminuem. De acordo com a lei de Moore, o poder de CPU vai dobrar a cada 18 meses no futuro próximo;
- b) permite mudança fácil dos parâmetros de entrada, facilitando a otimização de projeto;
- c) pode simular escalas reais, diferentemente de experimentos onde são utilizados modelos em escala reduzida;
- d) pode simular condições ideais, desprezando termos das equações governantes e focando apenas nos parâmetros essenciais;
- e) permite a exploração de eventos não-naturais, como explosões.

Outras vantagens do cálculo numérico sobre o experimental são que, segundo Ferziger e Peric (2002, p. 23-24), alguns problemas associados ao segundo podem ser facilmente tratados com CFD. Por exemplo, ao simular o escoamento em torno de um carro em movimento em um túnel de vento, é necessário fixar o carro e passar ar por ele, mas o chão deve mover-se à velocidade do ar, o que é difícil de fazer. Isto não é um problema em uma simulação numérica. Outros tipos de condições de contorno também são facilmente inseridos em modelagem computacional. Se as equações de Navier-Stokes tridimensionais em regime transiente fossem resolvidas com precisão, seria obtido um conjunto de dados do qual qualquer quantidade de significado físico poderia ser derivada. À primeira vista, isto faz com que simulações numéricas pareçam perfeitas. Contudo, estas vantagens da CFD dependem da solução precisa das equações de conservação, o que é extremamente difícil para a maior parte dos escoamentos que ocorrem na Engenharia.

Pelo seu elevado grau de complexidade, deve ser feito um estudo aprofundado da CFD antes de qualquer simulação numérica, visto que são utilizados conhecimentos de mecânica dos fluidos, métodos numéricos para solucionar sistemas de equações diferenciais, geração de malhas, métodos de interpolação, derivação numérica, integração numérica, métodos iterativos para solução de sistemas de equações algébricas, modelos de turbulência e tratamento de paredes. A Engenharia do Vento, por sua vez, requer conhecimento do comportamento de escoamentos em torno de corpos rombudos, de aerodinâmica, das

características do ar e do comportamento do vento na camada limite atmosférica. A pesquisa bibliográfica apresentada neste trabalho busca incluir as diferentes áreas de conhecimento da CFD, as quais não são comumente estudadas pelos profissionais da Engenharia Civil, de forma a embasar as escolhas feitas ao longo da modelagem do problema.

Com *softwares* comerciais de fácil utilização, este importante passo não é tomado por todos. Cochran (2006, p. 15) afirma que a observação realmente assustadora é que alguns consultores, sem grande conhecimento do vento e da física de escoamentos, estão aplicando programas comerciais criados para fluxos internos de baixa turbulência a ventos atmosféricos, externos e altamente turbulentos, em torno de edifícios. Tais exemplos levam alguns pesquisadores a se referir à CFD como *Colourful Flow Drawings* (desenhos coloridos de escoamentos). Os comentários do autor ressaltam a questão da importância de uma detalhada pesquisa precedente às simulações numéricas que serão feitas ao longo deste trabalho, cujos resultados devem ser sempre analisados de forma crítica e cujos dados de entrada não podem ser escolhidos sem o entendimento dos seus significados.

Este trabalho enfoca, portanto, a Dinâmica dos Fluidos Computacional e a análise aerodinâmica de um edifício. Inicialmente, o método utilizado será apresentado, com a definição da questão de pesquisa, objetivo primário, objetivos secundários, pressupostos, premissas, delimitações, limitações e delineamento. Em seguida, a revisão bibliográfica é apresentada. A primeira parte inclui as equações de conservação utilizadas e os métodos numéricos para resolvê-las. Na segunda parte, o problema da turbulência é discutido, incluindo alguns modelos usados, suas vantagens e dificuldades encontradas em escoamentos com altos números de Reynolds.

Os capítulos seguintes tratam do caso de estudo deste trabalho, o edifício da Texas Tech, com a apresentação do mesmo e dos passos que foram tomados para a sua simulação numérica. São apresentados estudos paramétricos utilizados para analisar a confiabilidade dos resultados, seguidos das comparações feitas com resultados descritos na literatura. Por fim, as conclusões do estudo são apresentadas.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a precisão dos valores das forças devidas ao vento em um edifício, obtidas pela Dinâmica dos Fluidos Computacional, em comparação com os medidos em escala real?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho, classificados como principal e secundários, são apresentados a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a realização de simulações numéricas para averiguar a precisão dos valores dos coeficientes de pressão em um edifício, encontrados através da Dinâmica dos Fluidos Computacional, em comparação aos medidos em escala real.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) a elaboração de um documento descrevendo a Dinâmica dos Fluidos Computacional, os métodos nela empregados e uma compilação de recomendações da literatura para aplicações na Engenharia do Vento;
- b) a análise da variação de parâmetros do problema no resultado final.

2.3 PRESSUPOSTOS

Como pressuposto para este trabalho se admite que as equações de Navier-Stokes simulam corretamente o escoamento laminar do vento em torno de obstáculos. Estas equações são usadas aqui considerando o fluido Newtoniano (de viscosidade constante) e incompressível. No caso do ar, a incompressibilidade não é uma característica intuitiva, mas esta simplificação pode ser feita quando o número de Mach, definido como a razão entre a velocidade do escoamento e a velocidade do som no meio, não supera 0,3. A velocidade do som no ar é em torno de 350 m/s em temperaturas usuais e a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 6) define que a maior velocidade básica do vento no Brasil é de 50 m/s, indicando que esta limitação costuma ser respeitada em problemas de Engenharia do Vento. O escoamento também é considerado a uma temperatura constante e sem influência das forças de gravidade e de Coriolis, o que é bastante razoável, visto que a altura do domínio nas simulações realizadas não é muito grande. Por fim, se pressupõe que os valores de pressão medidos em escala real e usados como comparação neste trabalho estão corretos.

2.4 PREMISSAS

Este trabalho parte das premissas que o cálculo das cargas de vento em estruturas civis é fundamental para o projeto adequado das mesmas e de que este deve ser feito da forma mais precisa possível.

2.5 DELIMITAÇÕES

As simulações são realizadas em um edifício específico, construído e instrumentado pela universidade Texas Tech, nos Estados Unidos, com o intuito de servir como referência para ensaios numéricos e experimentais. Isto também implica um terreno específico, com dada topografia e rugosidade, assim como uma velocidade de vento específica.

2.6 LIMITAÇÕES

As limitações presentes neste trabalho estão associadas ao uso de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Isto quer dizer que será empregado um *software* específico, no caso o *Fluent*, que utiliza o Método dos Volumes Finitos.

Como destacam Ferziger e Peric (2002, p. 34-35), soluções numéricas de escoamentos de fluidos são apenas **soluções aproximadas**. Além dos erros que podem ser introduzidos ao longo do desenvolvimento do algoritmo de solução, na programação ou na definição das condições de contorno (erros humanos), soluções numéricas sempre incluem três tipos de erros sistemáticos:

- a) **de modelagem**, definidos como a diferença entre o escoamento real e a solução exata do modelo matemático;
- b) **de discretização**, definidos como a diferença entre a solução exata das equações de conservação e a solução exata do sistema algébrico de equações obtido a partir de sua discretização;
- c) **de iteração**, definidos como a diferença entre as soluções iterativas e as soluções exatas do sistema algébrico de equações.

Os autores afirmam que, em fluxos laminares, erros de **modelagem** podem ser desprezados, visto que as equações de Navier-Stokes representam com precisão o escoamento. Porém, ao usar modelos de turbulência, estes erros podem se tornar muito grandes. A simplificação da geometria e das condições de contorno também se incluem nestes erros. Aproximações por **discretização** introduzem erros que são reduzidos com o refinamento das malhas. Um limitador para este refinamento é o maior tempo computacional que o acompanha. Erros de **iteração** e de arredondamento são considerados de fácil controle e de ordem de grandeza reduzida.

Os erros por modelagem da turbulência e por discretização são de grande importância neste trabalho e concessões de custo-benefício são consideradas. Quanto mais precisa a simulação da turbulência e quanto mais fina a malha, maior é o custo computacional da simulação.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho começou com uma **pesquisa bibliográfica**, visando uma maior compreensão do assunto e dos parâmetros do problema, como os métodos numéricos disponíveis, suas vantagens e desvantagens, características da turbulência e recomendações para a discretização do domínio.

Em seguida veio a **definição da geometria**, especificando as características do edifício e do meio em que ele está colocado.

A seguir, foi feita a **geração da malha**, incluindo a escolha do tipo de elemento usado e da forma com que o domínio é discretizado. Este processo requer controle de qualidade para diminuir os já mencionados erros por discretização. As condições de contorno são inseridas neste passo. É estimado que, em problemas práticos de Dinâmica dos Fluidos Computacional, com geometrias complexas, esta etapa ocupe cerca de 80% do tempo usado no projeto.

Após a geração da malha, veio a **definição dos métodos numéricos**, onde o modelo de turbulência foi escolhido, bem como o tamanho dos passos de tempo, critérios de convergência, número de passos de tempo e métodos numéricos utilizados.

Isto possibilitou que o **processamento** propriamente dito pudesse ocorrer, o que foi feito nos *clusters* do CESUP, Centro Nacional de Supercomputação, na UFRGS.

O passo seguinte foi a **análise dos resultados**, feita de forma crítica, incluindo a avaliação dos valores numéricos resultantes, assim como o comportamento qualitativo do escoamento. A comparação dos resultados com os disponíveis na literatura foi feita para verificar a validade das simulações. A partir desta análise, novas malhas foram feitas e diferentes métodos numéricos foram usados, em função dos resultados obtidos, visando a maior confiabilidade dos resultados.

Ao fim, foram feitas as **conclusões** do trabalho realizado. A figura 1 apresenta o fluxograma para a realização deste trabalho, de acordo com o que foi descrito acima, mostrando a relação de dependência entre os processos envolvidos.

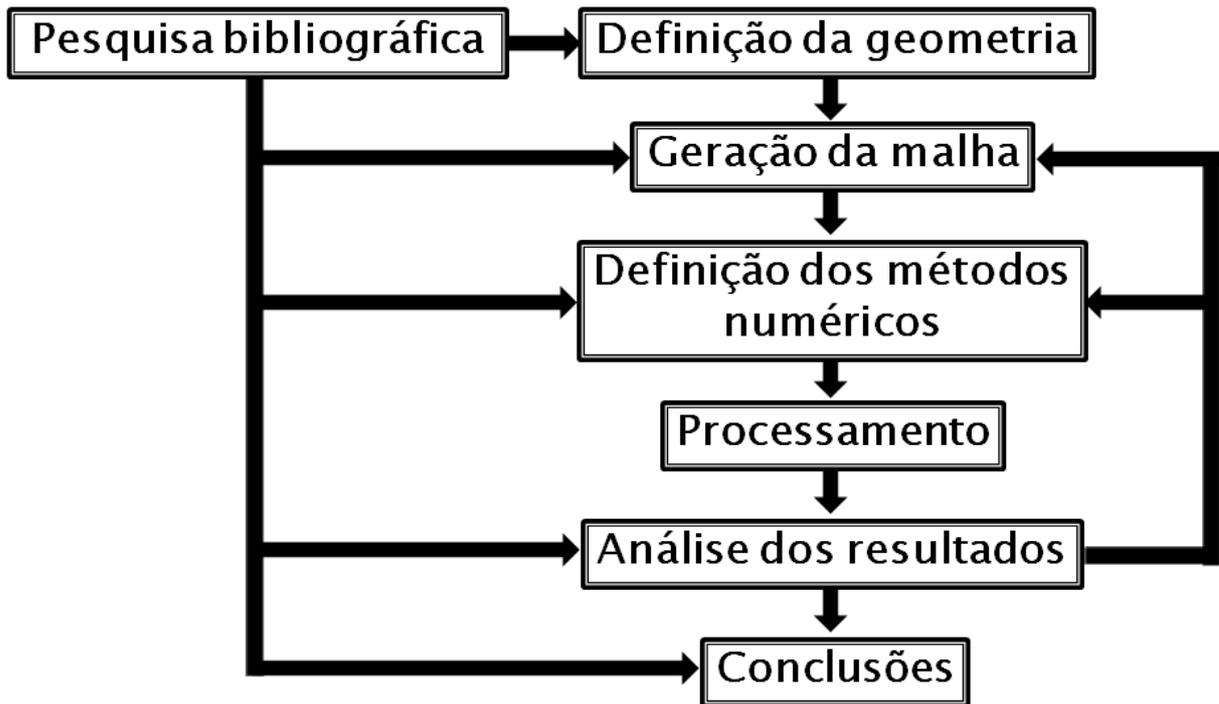


Figura 1: fluxograma da realização do trabalho

3 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

A seguir são apresentadas as equações envolvidas em problemas de mecânica dos fluidos e métodos para a solução das mesmas.

3.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

Problemas de fenômenos de transporte costumam envolver três equações de conservação: massa, quantidade de movimento e energia. A terceira não será usada neste trabalho, visto que a temperatura não será considerada no problema em questão.

A equação da conservação de massa, também conhecida como equação da continuidade, para fluidos incompressíveis, em forma diferencial e em coordenadas cartesianas é dada na equação 1 (FOX et al., 2004, p. 186):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

u, v, w = componentes cartesianas da velocidade do vento (m/s);

x, y, z = coordenadas cartesianas (m).

A conservação de quantidade de movimento para fluidos Newtonianos, incompressíveis e sem influência da gravidade é dada pelas equações de Navier-Stokes, que em coordenadas cartesianas são definidas pela equação 2 (FOX et al., 2004, p. 215):

$$\begin{aligned}
\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)
\end{aligned} \tag{equação 2}$$

Onde:

ρ = massa específica do fluido (1,184 kg/m³ para o ar a 25°C);

t = tempo (s);

p = pressão (Pa);

μ = viscosidade dinâmica do fluido (1,86x10⁻⁵ kg/m.s para o ar a 25°C).

Com isto, é obtido um problema com quatro equações e quatro incógnitas: **u**, **v**, **w** e **p**. Estas equações muitas vezes são escritas usando notação vetorial, com a equação da continuidade assumindo a forma da equação 3 (ANDERSON, 1995, p. 248) e as equações de Navier-Stokes, a da equação 4 (TANNEHILL et al., 1997, p.252-255):

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{equação 3}$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \cdot \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U \tag{equação 4}$$

Onde:

U = vetor com as componentes de velocidade **u**, **v** e **w** (m/s).

O lado esquerdo da equação 4 representa as forças inerciais, com o primeiro termo sendo a aceleração instável (em função do tempo) e o segundo representando a advecção (variação da

velocidade em função da posição, muitas vezes também chamado de termo convectivo). O primeiro termo do lado direito é chamado de gradiente de pressão e o segundo é um termo difusivo que representa a viscosidade.

Como dito anteriormente, estas equações representam de forma adequada escoamentos de fluidos, porém só podem ser resolvidas analiticamente em casos muito simples. Para geometrias complexas, é necessário o uso de métodos numéricos, discretizando o domínio em sistemas de equações diferenciais. Como destaca Maliska (2004, p. 4-5), os métodos tradicionalmente usados para a solução de sistemas de equações diferenciais são os de Diferenças Finitas, Volumes Finitos e Elementos Finitos. O primeiro e o terceiro trabalham com pontos no espaço discretizado e o segundo com volumes de controle. O Método dos Volumes Finitos será utilizado neste trabalho, uma vez que Gosman (1999, p. 27) confirma que este é o método mais usado atualmente em programas comerciais de Dinâmica dos Fluidos Computacional.

3.2 O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Segundo Ferziger e Peric (2002, p. 36), o Método dos Volumes Finitos utiliza a forma integral das equações de conservação como ponto de partida. O domínio é dividido em um número finito de volumes de controle (CV) e as equações de conservação são aplicadas a cada um deles. No centróide de cada CV está um nó computacional no qual os valores das variáveis são calculados. Para expressar valores nas faces do CV, métodos de interpolação são utilizados.

Os autores citam como vantagens do método o fato de poder ser usado com qualquer tipo de malha, sendo adequado para geometrias complexas, de ser um método conservativo por sua construção e por sua simplicidade de ser compreendido e programado, sendo que todos os termos aproximados numericamente possuem significado físico. Como desvantagem do método, está o fato de que ele realiza três níveis de aproximação: interpolação, derivação e integração.

É importante ressaltar que aqui será apresentado apenas **um método** de volumes finitos, dentre os vários existentes. Como afirma Maliska (2004, p. 28), todo método que satisfaz a

conservação da propriedade em nível de volumes elementares para obter as equações aproximadas é um método de volumes finitos.

Para entender melhor o método aqui adotado, é adequado representar as equações de conservação em forma integral aplicadas a um volume de controle. Assim, a equação da continuidade aplicada na superfície **CS** deste volume é definida pela equação 5 (BERGER, 1999, seção 3, p. 12):

$$\int \int_{CS} (U \cdot n) dA = 0 \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

n = vetor para fora ortogonal à superfície;

A = área da superfície (m^2).

Finalmente, escrevendo a equação na forma discreta utilizando valores nos pontos de integração **ip** no centro de cada face **i** da superfície é obtida a equação 6 (ANSYS, INCORPORATION, 2006, p. 280):

$$\sum (U_i \cdot \Delta n_i)_{ip} = 0 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

Δn_i = vetor para fora da superfície discreta (m^2).

Isto facilita o entendimento da equação de continuidade, esclarecendo que ela representa que a quantidade de massa dentro de um volume incompressível deve permanecer constante (lembrando que a velocidade é multiplicada pela massa específica do fluido, que foi omitida por ser considerada constante, e que este produto é multiplicado por um elemento de área).

As equações de Navier-Stokes passam por um processo similar, porém por possuírem termos não lineares, tem uma forma discreta mais complexa. Enquanto a equação da continuidade

pode ser descrita por uma equação algébrica, usando apenas a velocidade nos pontos de integração e a área das faces da superfície de controle, a forma discreta das equações de Navier-Stokes possui uma derivada temporal no primeiro termo e uma espacial no termo da viscosidade. A derivação temporal será explicada adiante, por enquanto considerando seu valor no centro do volume como conhecido. O termo da viscosidade fica dependente da derivada espacial da velocidade, calculada nos pontos de integração a partir dos valores da velocidade no centro dos volumes adjacentes. O primeiro termo é, então, integrado multiplicando a derivada de tempo no centro do volume de controle pelo volume do mesmo e a massa específica do fluido e o termo da viscosidade é obtido de forma similar à equação da continuidade, visto que também é integrado na superfície de controle. As formas discretas destas equações são mostradas em detalhes por ANSYS, Incorporation (2006, p. 280). Com estas informações tornam-se visíveis os três níveis de aproximação citados anteriormente:

- a) **interpolação** dos valores da velocidade e pressão nos pontos de integração a partir de seus valores no centro dos volumes de controle;
- b) **derivação** da velocidade no espaço em função dos pontos adjacentes, onde seus valores integrais são conhecidos, e da velocidade no tempo em função dos passos de tempo anteriores;
- c) **integração**, multiplicando valores no centro das faces pela área das mesmas e valores no centro dos volumes pelo volume dos mesmos.

Observa-se, portanto, que embora o Método dos Volumes Finitos calcule os valores das variáveis no centro dos volumes de controle, os valores destas nos pontos de integração (nas faces dos volumes) são utilizados em muitos passos do algoritmo. Torna-se essencial, então, o estudo de como as interpolações utilizadas para calcular estes valores serão realizadas para cada termo.

3.3 FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO

Para o cálculo dos valores de uma variável qualquer na face entre dois volumes, sendo o seu valor conhecido no centro dos volumes adjacentes, diversos métodos de interpolação podem ser usados. Os esquemas a seguir procuram calcular o valor da variável genérica ϕ na face e , com o escoamento sendo de W para E e sendo os valores de ϕ conhecidos nos centros dos volumes de dimensões idênticas P , W e E , conforme a figura 2.

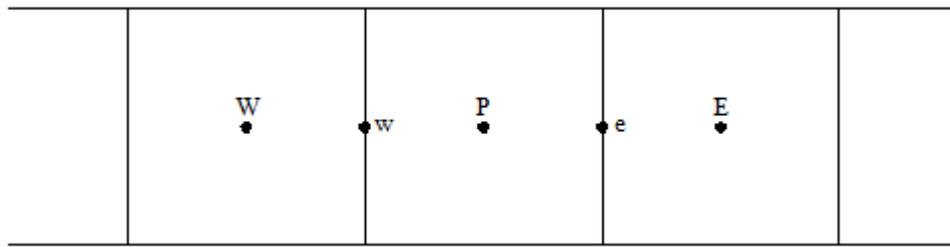


Figura 2: volumes de controle com pontos centrais e de interpolação

3.3.1 Esquema *Upwind* de primeira ordem

De acordo com Fluent Incorporation (2005, seção 25.3.1), o Esquema *Upwind* (barlavento) de primeira ordem (UDS) assume que os valores das variáveis nas faces de um elemento são iguais aos valores armazenados no centro dos mesmos. Portanto, ao escolher este método, o valor das variáveis em uma face são tomados como iguais ao valor das mesmas no centro do elemento a barlavento da face em questão. Assim, a fórmula fica de acordo com a equação 7:

$$\varphi_e = \varphi_P \quad (\text{equação 7})$$

Segundo Maliska (2004, p. 77), este esquema possui a vantagem de evitar coeficientes negativos na função de interpolação, que podem gerar divergências ou oscilações numéricas. Porém, Fluent Incorporation (2005, seção 25.8.1) afirma que esquemas de primeira ordem só devem ser usados quando o escoamento está alinhado com a malha, caso contrário, estes aumentam os erros de discretização (difusão numérica). Portanto, para malhas triangulares ou tetraédricas em escoamentos simples e para malhas quadrangulares ou hexaédricas em escoamentos complexos, esquemas de segunda ordem costumam fornecer resultados mais precisos, mesmo os de primeira ordem permitindo convergência melhor.

3.3.2 Esquema de Diferenças Centrais

Segundo Maliska (2004, p. 82), o Esquema das Diferenças Centrais (CDS) usa interpolação linear, fornecida pela equação 8 para os volumes apresentados acima:

$$\varphi_e = \frac{\varphi_P + \varphi_E}{2} \quad (\text{equação 8})$$

Fluent Incorporation (2005, seção 25.3.1) afirma que este esquema possui precisão de segunda ordem e reconhece que ele é notório por sua instabilidade numérica, mas oferece termos adicionais para a equação apresentada, evitando o problema mencionado, sugerindo o uso do CDS para o modelo de turbulência LES. As equações com termos adicionais não serão apresentadas neste trabalho.

3.3.3 Esquema *Upwind* Quadrático

Ferziger e Peric (2002 p. 78) apontam que a próxima melhoria lógica seria a interpolação por meio de uma parábola, com o terceiro ponto necessário para a construção da mesma sendo pego a barlavento, respeitando a natureza da convecção. *Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics* (QUICK) é, de acordo com Fluent Incorporation (2005, seção 25.3.1), baseado na média ponderada de um esquema *Upwind* de segunda ordem e interpolações centrais, sendo tipicamente mais preciso em malhas estruturadas alinhadas com a direção do escoamento, onde pontos a barlavento e sotavento são facilmente identificados.

Segundo Bruno e Khris (2003, p. 805), ao contrário do CDS que possui efeitos dispersivos, o esquema QUICK possui efeitos difusivos, normalmente estabilizando a simulação, mas diminuindo a amplitude do sinal. Maliska (2004, p. 77) afirma que a aproximação QUICK é ligeiramente superior à CDS, mas que ambas convergem com erro de segunda ordem. A fórmula é dada pela equação 9:

$$\varphi_e = -\frac{1}{8}\varphi_W + \frac{6}{8}\varphi_P + \frac{3}{8}\varphi_E \quad (\text{equação 9})$$

3.4 PROBLEMAS TRANSIENTES

Para escoamentos transientes, isto é, não constantes no tempo, os termos das equações de conservação devem ser calculados a cada passo de tempo. Também, o primeiro termo das Equações de Navier-Stokes, que possui uma derivada da velocidade em função do tempo, deve ser considerado e resolvido numericamente. Métodos para este cálculo incluem o de primeira e segunda ordem.

3.4.1 Discretização de Primeira Ordem

Na discretização de primeira ordem, o valor da derivada temporal da variável genérica ϕ fica definido como a diferença entre seu valor no passo de tempo atual t e no anterior dividida pelo tamanho deste passo de tempo de acordo com a equação 10 (ANSYS, INCORPORATION, 2006, p. 280):

$$\frac{\partial \phi^t}{\partial t} = \frac{\phi^t - \phi^{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (\text{equação 10})$$

3.4.2 Discretização de Segunda Ordem

A discretização de segunda ordem, como o nome indica, utiliza dois passos de tempo, possibilitando uma precisão maior, mas a necessidade de armazenar e utilizar duas séries de dados anteriores ao passo de tempo atual, indicando maiores gastos computacionais. A formulação matemática é dado pela equação 11 (FLUENT INCORPORATION, 2005, seção 25.3.2):

$$\frac{\partial \varphi^t}{\partial t} = \frac{3\varphi^t - 4\varphi^{t-\Delta t} + \varphi^{t-2\Delta t}}{2\Delta t} \quad (\text{equação 11})$$

3.5 ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE

A solução do sistema de equações definido pelas equações de conservação tem, segundo Maliska (2004, p. 117), a dificuldade de definir o valor da pressão. Não basta isolar \mathbf{p} de uma das componentes da equação de Navier-Stokes, já que os gradientes nas três direções devem ser combinados para o cálculo da pressão no volume de controle. A equação da continuidade não serve de equação evolutiva para nenhuma variável, sendo apenas uma restrição que o campo de velocidades deve obedecer. Assim, os passos que devem ser seguidos para o cálculo das incógnitas do sistema de equações definido são:

- a) calcular um valor para \mathbf{p} através de um algoritmo;
- b) calcular as componentes da velocidade pelas equações de Navier-Stokes;
- c) verificar se as velocidades satisfazem a equação da continuidade. Em caso negativo, alterar o valor de \mathbf{p} . Repetir estes passos até que a equação da conservação de massa seja respeitada.

A seguir, são apresentados dois algoritmos usados para o cálculo de \mathbf{p} .

3.5.1 Método SIMPLE

O método *Semi Implicit Linked Equations* (SIMPLE), é descrito por Maliska (2004, p. 123-127) como aquele do qual derivaram muitos outros. A pressão é descrita como um valor estimado \mathbf{p}^* somado a uma correção \mathbf{p}' . O valor da correção é obtido inserindo um termo de pressão nas equações de Navier-Stokes e obtendo equações para as componentes da velocidade \mathbf{u}^* , \mathbf{v}^* e \mathbf{w}^* em função de \mathbf{p}' . Estas equações para a velocidade são inseridas na equação da continuidade em forma discreta obtendo-se uma equação de Poisson para \mathbf{p}' , dependente das dimensões do volume de controle e dos valores de correção de pressão dos

volumes adjacentes. Com isto, o valor de \mathbf{p} no volume é encontrado e é utilizado nas equações de conservação para a obtenção das incógnitas restantes. Se a equação da continuidade ainda não for respeitada, o algoritmo deve ser repetido tomando o valor da pressão encontrado pelos passos descritos como o \mathbf{p}^* do novo processo.

O autor cita como vantagem do método o fato de não ser necessária a solução de um sistema linear para determinar a pressão. Como desvantagem, a baixa velocidade de convergência requer muitas repetições do algoritmo. Fluent Incorporation (2005, seção 25.4.3) comenta o aumento da velocidade de convergência com algoritmos que realizam correções adicionais, como é o caso do PISO.

3.5.2 Método PISO

O método *Pressure-Implicit with Splitting Operators* (PISO) como já comentado, é similar ao SIMPLE, porém realiza correções adicionais buscando aumentar a eficiência do processo. De acordo com Fluent Incorporation (2005, seção 25.4.3), a primeira correção é chamada de correção de quantidade de movimento e, após a solução inicial da equação da correção da pressão, o gradiente é recalculado e utilizado para atualizar as correções de fluxo de massa. Este último processo reduz significativamente dificuldades de convergência associados a malhas muito distorcidas. Segundo Ferziger e Peric (2002 p. 178), o algoritmo realizado pelos métodos citados pode ser resumido da seguinte forma:

- a) iniciar os cálculos para o tempo atual \mathbf{t} utilizando como estimativa para as incógnitas, os valores calculados no passo de tempo anterior;
- b) montar e resolver o sistema algébrico linearizado para componentes da velocidade através das equações de quantidade de movimento para obter \mathbf{u}^* , \mathbf{v}^* e \mathbf{w}^* .
- c) montar e resolver a equação para a correção de pressão \mathbf{p}' ;
- d) corrigir os valores da velocidade e pressão a partir de \mathbf{p}' . Para o algoritmo PISO, resolver a segunda equação de correção de pressão e corrigir velocidade e pressão novamente;
- e) retornar ao passo b) utilizando os valores novos das incógnitas até que os valores de correção sejam desprezíveis;

f) avançar para o próximo passo de tempo.

Fluent Incorporation (2005, seção 25.9.1) recomenda o algoritmo PISO para problemas transientes, especialmente com passos de tempo grandes, sugerindo para o modelo de turbulência LES, que utiliza passos pequenos, o uso de algoritmos como o SIMPLE para reduzir gastos computacionais.

4 MÉTODOS PARA LIDAR COM A TURBULÊNCIA

Os métodos vistos até aqui representam com grande precisão escoamentos laminares, sem presença de vórtices. No entanto, nos casos de interesse para a Engenharia do Vento, os escoamentos são altamente turbulentos. Isto traz uma série de dificuldades na solução de problemas de Dinâmica dos Fluidos Computacional que serão abordadas neste capítulo. Algumas características de escoamentos turbulentos citadas por Ferziger e Peric (2002, p. 265):

- a) são altamente instáveis, sendo que a velocidade parece aleatória em função do tempo;
- b) são tridimensionais, mesmo que a velocidade média seja função de duas coordenadas, as flutuações do campo instantâneo ocorrem em todas direções;
- c) contém uma grande vorticidade;
- d) a turbulência aumenta a taxa com que parcelas do fluido são misturadas, fazendo com que partes com diferentes quantidades de movimento entrem em contato. A redução do gradiente de velocidades devido à viscosidade reduz a energia cinética do escoamento, dissipando energia;
- e) possuem estruturas coerentes, eventos determinísticos passíveis de serem repetidos responsáveis por grande parte da mistura. Porém, as componentes aleatórias de escoamentos turbulentos dificultam o estudos destes eventos;
- f) flutuam em uma grande gama de escalas de comprimentos e tempo. Esta propriedade dificulta a Simulação Numérica Direta de escoamentos turbulentos.

Um importante indicador do nível de turbulência de um escoamento é o número de Reynolds. Como apontam Kundu e Cohen (2002, p. 268), este número é uma quantidade adimensional que representa a razão entre as forças inerciais e viscosas. Ele é calculado pela equação 12:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

L = comprimento característico do escoamento (m).

Por exemplo, em um edifício cúbico de 30 m de base, em que incide vento a 20 m/s, o número de Reynolds é aproximadamente $3,8 \times 10^7$, um valor bastante elevado e, como destacam Fox et al. (2004, p. 285), números de Reynolds grandes geralmente representam escoamentos turbulentos enquanto valores baixos indicam escoamentos laminares. Este número é tão importante para caracterizar escoamentos que, como confirmam Kundu e Cohen (2002, p. 260), para escoamentos incompressíveis e em que os efeitos da gravidade não são relevantes, o coeficiente de arrasto de uma estrutura depende apenas do número de Reynolds.

4.1 MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

Diversas formas de modelagem da simulação de escoamentos turbulentos estão disponíveis na literatura. Aqui são apresentados as três principais:

- a) a Simulação Direta da Turbulência;
- b) as equações RANS, resolvidas com o modelo k- ϵ RNG;
- c) a Simulação de Grandes Escalas.

4.1.1 Simulação Direta da Turbulência

A Simulação Direta da Turbulência (*Direct Numerical Simulation*, DNS), é, segundo Ferziger e Peric (2002, p. 268) a forma mais precisa e simples de resolver problemas turbulentos. Em tais simulações, todos os movimentos contidos no escoamento são resolvidos diretamente, sem aproximações além da discretização das equações de conservação.

Como afirmado anteriormente, escoamentos turbulentos possuem uma grande gama de escalas de comprimento e tempo. Na DNS estas não são modeladas, e sim, resolvidas diretamente. Moin e Mahesh (1998, p. 544-546) afirmam que o tamanho da malha determina

os comprimentos que são representados, tendo esta que ser suficientemente fina para representar as menores escalas de comprimento e a necessidade de precisão em diversas escalas de tempo requerem passos de tempo suficientemente pequenos. Usualmente, a menor escala de comprimento a ser resolvida é uma função da escala de comprimento de Kolmogorov η , fornecida na equação 13:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

ν = viscosidade cinemática do fluido (μ/ρ);

ε = taxa de dissipação da energia cinética (m^2/s^3).

Uma estimativa simples da magnitude do comprimento de Kolmogorov pode ser feita com as equações para a energia cinética turbulenta e ε dadas por Fluent Incorporation (2005, seção 7.2.2), usando a fórmula para a escala de comprimento dada por Solari e Piccardo (2001, p. 79) e calculando a intensidade de turbulência de acordo com o Eurocode 1-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2004, p. 22). Com isto, observa-se que, por exemplo, para um vento de velocidade 20 m/s a 30 metros acima de um terreno de rugosidade 0,005 metro, η fica na ordem de décimo de milímetro. Usando uma malha deste tamanho em um domínio de algumas dezenas de metros em cada direção seriam necessários cerca de 10^{14} volumes de controle, um número impraticável mesmo nos supercomputadores atuais.

Reconhecendo as limitações da DNS a números de Reynolds baixos, Moin e Mahesh (1998, p. 551-552) a enxergam como uma ferramenta de pesquisa, e não como força bruta para resolver as equações de Navier-Stokes em problemas práticos. O objetivo, portanto, não é reproduzir escoamentos da vida real, mas a realização de estudos controlados que permitam o desenvolvimento de melhor entendimento, leis de escala e modelos de turbulência.

Tomando uma posição similar, Wilcox (1998, p. 381-382) cita como duas aplicações da DNS o uso estatístico dos seus resultados para testar modelos aproximados propostos e o melhor entendimento da estrutura da turbulência para desenvolvimento de métodos para seu controle

(como redução do arrasto). A Simulação Numérica Direta também pode ser vista como uma fonte adicional de dados experimentais, sendo especialmente útil para obter dados de difícil medição, como flutuações na pressão.

4.1.2 Equações Médias de Reynolds e o modelo k-ε RNG

RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*, normalmente traduzido como Equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds) apresentam uma forma mais econômica de resolver problemas turbulentos. As equações de conservação são reescritas considerando as variáveis como a soma de seus valores médios no tempo (representados por convenção por uma linha horizontal sobre um termo) e uma flutuação (representada como u' no caso da velocidade), como descrito na equação 14 (WILCOX, 1998, p. 31):

$$U = \overline{U} + u' \quad (\text{equação 14})$$

Como normalmente é feito na literatura, a partir deste ponto do trabalho as equações são apresentadas em notação tensorial, fazendo com que a equação da continuidade tome a forma da equação 15 e as equações de Navier-Stokes tomem a forma mostrada na equação 16 (WILCOX, 1998, p. 35):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{equação 15})$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{equação 16})$$

Substituindo a equação 14 nas equações 15 e 16, são obtidas as equações 17 e 18 (WILCOX, 1998, p. 36), que são as fórmulas que devem ser resolvidas em problemas RANS. O termo

entre colchetes da equação 18 é também escrito com frequência na forma ilustrada na equação 19.

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{equação 17})$$

$$\rho \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial t} + \rho \overline{U}_j \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_j u'_i} \right] \quad (\text{equação 18})$$

$$\mu \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_j u'_i} = \mu 2 \overline{S_{ji}} + \rho \cdot \tau_{ij} \quad (\text{equação 19})$$

As equações obtidas são quase idênticas às equações de conservação usuais, mas com uma importante diferença: a inclusão do termo final da equação 18, frequentemente representado como na equação 19, $\rho \cdot \tau_{ij}$. Segundo Wilcox (1998, p. 36) este termo se chama tensor de tensões de Reynolds e o problema fundamental da turbulência é que, para calcular as propriedades médias do escoamento, é requerido também encontrar o valor deste tensor, sendo então necessárias equações adicionais. O termo S_{ij} é chamado de tensor de taxa de deformação.

Entre as diversas formas de resolver problemas do tipo RANS estão os modelos de duas equações. Um destes é o chamado k-ε, onde **k** é a energia cinética turbulenta e **ε** a taxa de dissipação. Dentre os modelos k-ε disponíveis, aqui será apresentado o RNG (*renormalization group*, grupo de renormalização). Este modelo tem, segundo seus autores Yakhot et al. (1992, p. 1510) a vantagem de suas constantes serem calculadas explicitamente, sem necessidade de ajustes *ad hoc*. Além disto, de acordo com Bruno et al. (2001, p. 331), este modelo é superior ao modelo padrão, quando acoplado a funções de parede não equilibradas, para simular a separação e interação entre vórtices em escoamentos em torno de corpos rombudos.

Fluent Incorporation (2005, seção 12.4.1) aponta que o modelo k - ε está na classe de modelos de turbulência mais usados em aplicações industriais de CFD. Sua robustez, economia e precisão razoável para uma grande variedade de problemas turbulentos explicam sua popularidade para escoamentos industriais e simulações de transferência de calor. É um modelo semi-empírico, no qual a equação de transporte de k foi derivada de forma exata, enquanto a equação para ε foi obtida por raciocínio da física do problema e possui pouca semelhança com sua forma exata. O modelo assume que o escoamento é completamente turbulento e que os efeitos da viscosidade molecular são desprezíveis.

Como afirma Wilcox (1998, p. 106), este modelo assume que a hipótese de Boussinesq é válida, ou seja, que a massa específica é constante. A partir disto, se chega na equação 20:

$$\tau_{ij} = 2\nu_T \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3}k \cdot \delta_{ij} \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

ν_T = viscosidade turbulenta (m^2/s);

δ_{ij} = função Delta de Kronecker (1 se $i = j$, 0 se $i \neq j$).

A viscosidade turbulenta e as equações de transporte para k e ε , são dadas pelas equações 21, 22 e 23. O sistema de equações pode ser resolvido com as equações 24 e 25, que definem alguns coeficientes das equações anteriores (WILCOX, 1998, p. 124-125):

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{equação 21})$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{equação 22})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (\text{equação 23})$$

$$C_{\varepsilon 2} = \hat{C}_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \lambda^3 \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_o} \right)}{1 + \beta \lambda^3} \quad (\text{equação 24})$$

$$\lambda = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}} \quad (\text{equação 25})$$

Onde:

$C_\mu =$ constante (0,085);

$\sigma_k =$ constante (0,72);

$C_{\varepsilon 1} =$ constante (1,42);

$\sigma_\varepsilon =$ constante (0,72);

$\hat{C}_{\varepsilon 2} =$ constante (1,68);

$\lambda_o =$ constante (4,38);

$\beta =$ constante (0,012).

4.1.3 Simulação de Grandes Escalas

Segundo Fluent Incorporation (2005, seção 12.9.1), *Large Eddy Simulation* (LES, normalmente traduzido como Simulação de Grandes Escalas) é um modelo que está entre DNS e RANS. Como o custo para que todas as escalas da turbulência sejam resolvidas por DNS é muito alto, o modelo LES resolve apenas os vórtices grandes, modelando os pequenos (responsáveis pela dissipação da energia cinética turbulenta). O modelo pode ser resumido pelos seguintes princípios:

- a) quantidade de movimento, massa e outros valores escalares são transportados principalmente por vórtices grandes;

- b) vórtices grandes dependem do problema, sendo ditados pela geometria e condições de contorno;
- c) vórtices pequenos dependem menos da geometria, tendendo a serem mais isotrópicos e, conseqüentemente, mais fáceis de modelar;
- d) a probabilidade de encontrar um modelo universal de turbulência é muito maior para vórtices pequenos.

A mesma fonte afirma que, por esse meio, é possível usar malhas mais espaçadas e passos de tempo maiores em LES do que em DNS, embora ambos continuem sendo substancialmente menores que aqueles usados em RANS. Além disso, LES requer maior tempo processando para que estatísticas estáveis de escoamentos sejam obtidas. Por estes motivos, tais simulações costumam ter custo computacional de ordens de grandeza maiores que RANS. Em um exemplo dado por Rodi (1997, p. 73), o tempo de processamento para o mesmo escoamento no mesmo computador levou 2 horas em RANS e 73 em LES. Porém, como exemplo de vantagem sobre a DNS, Wilcox (1998, p. 387) cita simulações com resultados de igual qualidade para DNS e LES onde a segunda usou 3% da quantidade de pontos da primeira e terminou seu processamento em 2% do tempo.

Fluent Incorporation (2005, seção 12.9.2) explica que as equações utilizadas em LES são obtidas filtrando as equações de Navier-Stokes. Esta filtragem pode ser feita (como no caso do programa *Fluent*) diretamente pela discretização de volumes finitos, sendo então o volume da célula o tamanho mínimo dos vórtices simulados.

As equações de conservação filtradas são muito similares à forma RANS, mas com média espacial. Segundo Kim e Menon (1997, p. 1), os termos são divididos em componentes de grandes escalas (representados com um traço horizontal sobre o símbolo) e escala submalha (*subgrid-scale*, SGS). Seguindo esta convenção, segundo Ferziger e Peric (2002, p. 278), a equação da continuidade fica igual à equação 17 e as equações de Navier-Stokes, conforme a equação 26:

$$\rho \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \overline{U}_i \overline{U}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^s \right] \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

τ_{ij}^s = tensão de Reynolds de escala submalha.

A tensão de Reynolds, assim como em RANS, deve ser modelada, neste caso com modelos de SGS. Como afirma Petry (2002, p. 44), o modelo tradicionalmente empregado para isso é o de Smagorinsky (1963), em que se usa um comprimento de mistura SGS L_S , que é calculado pela equação 27. A partir deste valor, se calcula a viscosidade turbulenta com a equação 28 (FLUENT INCORPORATION, 2005, seção 12.9.3).

$$L_S = \min (\kappa \cdot y_p, C_S \Delta_f^{1/3}) \quad (\text{equação 27})$$

$$\mu_t = \rho \cdot L_S^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}} \quad (\text{equação 28})$$

Onde:

κ = constante de Karman (aproximadamente 0,4);

y_p = distância do volume à parede (m);

C_S = constante de Smagorinsky (aproximadamente 0,1);

Δ_f = tamanho do filtro, tomado como a raiz cúbica do volume da célula (m).

A necessidade de fornecer ao problema antes da sua solução um valor de C_S foi posteriormente removida com o modelo dinâmico de Smagorinsky, fornecido inicialmente por Germano et al. (1991) e modificado por Lilly (1992). Neste, a constante é calculada dinamicamente, no tempo e no espaço, em função das escalas resolvidas. O processo aumenta o tempo de processamento consideravelmente.

Tamura (2008, p. 1451-1452, 1470) afirma que, com o desenvolvimento de modelos numéricos, LES pode prever o escoamento de vento em torno de edifícios e pontes em condições muito próximas das reais, portanto tornando possível o seu uso na Engenharia do Vento. Este modelo é definitivamente capaz de fornecer valores precisos, comparáveis aos

obtidos em túneis de vento. É esperado que LES se torne independente de modelos experimentais e introduza um novo conceito de projeto por CFD. A redução do preço de CPU e o desenvolvimento de algoritmos eficientes de processamento paralelo devem resolver problemas de custo computacional.

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA A DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO

É importante que a discretização do domínio de cálculo seja feita adequadamente e, em problemas com escoamentos turbulentos, isto exige que a malha respeite certos limites na proximidade de paredes. Além disto, passos de tempo suficientemente pequenos devem ser adotados para a estabilidade e confiabilidade da simulação. A seguir, são fornecidas recomendações para estas duas formas de discretização, espacial e temporal.

4.2.1 Tratamento de paredes

Segundo Ferziger e Peric (2002, p. 298), a parte viscosa da camada limite, na presença de altos números de Reynolds, é tão pequena que é difícil ter a malha fina o bastante para resolvê-la. Este problema pode ser evitado usando funções de parede, que se baseiam na existência de uma região logarítmica no perfil de velocidades.

Os programas que utilizam funções e modelos de parede dividem a camada limite em uma parte viscosa próxima à parede (onde a viscosidade cinemática é o valor dominante), uma parte distante turbulenta e uma parte intermediária entre as duas como mostrado por Fluent Incorporation (2005, seções 12.10.1 e 12.10.2). Neste trabalho não são apresentados detalhes de todas as fórmulas utilizadas, apenas são definidas duas variáveis adimensionais utilizadas por esta fonte para definir o início e o fim destas camadas, y^* e y^+ , calculadas no ponto \mathbf{P} do volume adjacente à parede e dadas pelas equações 29 e 30:

$$y^* = \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (\text{equação 29})$$

$$y^+ = \frac{\rho u_{\tau} y_P}{\mu} \quad (\text{equação 30})$$

Onde:

u_{τ} = velocidade de fricção, função da massa específica e tensão na parede (m/s).

Estes valores são úteis para avaliar se o tamanho da malha próxima às paredes é adequado. Fluent Incorporation (2005, seções 12.10.2 e 12.11.1) afirma que ao usar funções de parede, o centróide do volume adjacente à parede deve se localizar dentro da camada turbulenta (de lei logarítmica), portanto y^* e y^+ devem estar entre 30 e 300. Um valor próximo de 30 para y^+ é sugerido, devendo a malha ser modificada para ser mais fina ou grossa na camada limite para respeitar estes valores. Em LES, tais recomendações não se aplicam, sendo apenas sugerido que a malha seja muito fina na proximidade de paredes ($y^+ = 1$).

4.2.2 Escolha do passo de tempo

O tamanho do passo de tempo, Δt , é um fator importante em problemas transientes turbulentos. Como já comentado, os vórtices possuem grande variedade de escalas de tempo, sendo necessário que o Δt seja suficientemente pequeno para representar bem os menores vórtices simulados, mas sem ser pequeno demais a ponto de tornar o tempo de processamento muito longo. É mais um caso, portanto, em que deve se tomar um valor razoável a fim de obter a precisão desejada em um tempo de cálculo aceitável.

Como destaca ANSYS, Incorporation (2006, p. 19-20), um indicador do tamanho do passo de tempo é o número de Courant, um número adimensional definido pela equação 31. Ele é muito importante na utilização de métodos explícitos, onde seu valor normalmente deve ser

aproximadamente igual à unidade para estabilidade. *Softwares* que utilizam métodos implícitos, como o *ANSYS-CFX*, não possuem esta limitação, mas em alguns casos é recomendado que o valor do número de Courant seja baixo:

$$Courant = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (\text{equação 31})$$

Onde:

Δx = tamanho da malha (m).

A empresa responsável pelo *Fluent*, outro *software* que utiliza métodos implícitos, Fluent Incorporation (2005, seção 25.17.1), afirma que uma boa maneira para verificar se Δt está suficientemente baixo é que o programa necessite de poucas iterações em cada passo de tempo para convergir. A mesma fonte também sugere que para cálculos eficientes e estáveis, o número de Courant não deve exceder valores entre 20 e 40 nas regiões mais sensíveis do domínio.

Apesar das recomendações possuírem cunho matemático, há um motivo físico para manter o número de Courant igual a um: se ele for superior, o fluido passa por uma distância maior que o tamanho da malha em um passo de tempo. Isto significa que ele pode passar por dois nós em apenas um passo, o que gera falta de precisão onde há mudanças na velocidade, visto que os esquemas de interpolação e as equações de conservação costumam usar os valores de ao menos dois nós adjacentes.

4.3 CONFIABILIDADE

Em Dinâmica dos Fluidos Computacional e, principalmente em Engenharia do Vento Computacional, a confiabilidade dos resultados é um fator muito discutido. Stathopoulos (1997) comenta sobre as limitações dos métodos numéricos em algumas aplicações simples, como vento incidindo de forma oblíqua no edifício da Texas Tech. Os resultados neste caso não são tão precisos quanto os encontrados em túneis de vento quando comparados a valores

obtidos de experimentos em escala real (daqui em diante chamados valores corretos). Porém, no mesmo artigo, está disponível um caso com incidência do vento perpendicular à parede em que um estudo numérico utilizando LES gerou valores mais próximos aos corretos do que um túnel de vento.

É importante salientar que resultados experimentais não são idênticos aos corretos. No caso comentado acima, uma posterior simulação em túnel de vento gerou resultados próximos aos corretos, indicando que dispersões não estão presentes apenas em simulações numéricas. Ferziger (1990, p. 5) salienta que erros de mais de 25% podem ser aceitáveis na Engenharia do Vento, portanto estas variações podem ser toleradas.

Uma das vantagens já citadas da CFD é que ela pode simular fenômenos em escala real, dispensando modelos em escala reduzida. Não é este o caso da Engenharia do Vento em modelos experimentais. Para uma semelhança aerodinâmica seria necessário que estes modelos fossem feitos mantendo o número de Reynolds constante. Niemann (1993, p. 149) afirma que na maior parte dos casos existe um valor mínimo para o qual valores superiores de **Re** não modificam o comportamento do escoamento. Estes valores são menores para corpos com pontos de separação fixos (arestas vivas) e maiores para formas semi-aerodinâmicas.

Isto facilita a simulação experimental, sendo que seria extremamente difícil realizá-la mantendo semelhança de Reynolds para estruturas grandes. Mesmo assim, os efeitos da mudança de **Re** podem ser significativos. Larose e D'Auteuil (2006) afirmam isto em um artigo em que diversos corpos rombudos com arestas vivas são estudados e a dependência do número de Reynolds se mostra significativa. É, portanto, difícil definir a sensibilidade da aerodinâmica de um corpo a **Re**. Os autores sugerem que uma considerável análise dos seus efeitos deve ser feita em quase todos os casos.

Em outro estudo recente, Lim et al. (2007) mostram dependência de Reynolds nas pressões flutuantes de cubos perpendiculares ao vento, um caso bastante simples e similar ao de um edifício. Com os cubos a um ângulo de 45°, a dependência também se deu nas pressões médias. Com estas informações, as variações apresentadas nos resultados obtidos por CFD deixam de ser tão chocantes. Tanto em modelos numéricos quanto em experimentais, estimativas de erros devem ser feitas.

5 CASO DE ESTUDO: O EDIFÍCIO DA TEXAS TECH

O edifício utilizado nas simulações deste trabalho foi construído pela universidade Texas Tech, nos Estados Unidos, com o intuito de fornecer valores em escala real para que comparações com túneis de vento e simulações numéricas possam ser feitas. O edifício possui, de acordo com Levitan e Mehta (1992, p. 1566), 13,7 m de largura, 9,1 m de comprimento e 4 m de altura (**H**), duas águas no telhado com inclinações de 1,65 % na menor direção, foi construído em metal e pode girar em torno do seu eixo, a fim de poder definir o ângulo de incidência do vento sobre ele. Mais de cem medidores de pressão foram instalados nele para o registro do coeficiente de pressão em diversos pontos diferentes. Os usados neste trabalho estão ao longo da linha média ABCDE, sendo estes os pontos médios das arestas, como representado na figura 3.

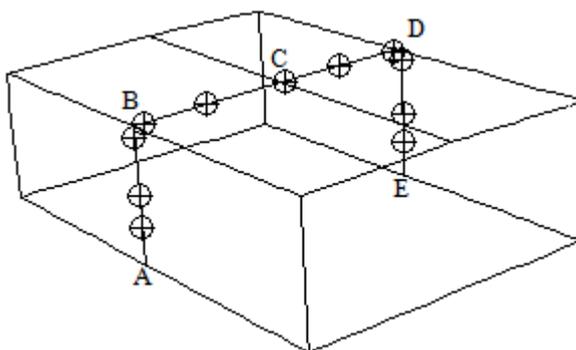


Figura 3: edifício da Texas Tech com os medidores de pressão na linha média

Segundo Yeatts e Mehta (1993, p. 215), a 49 m a oeste do edifício, está situada uma torre meteorológica de 46 m de altura. Esta possui instrumentação em seis diferentes níveis, para que a avaliação do perfil de velocidades do vento, assim como características da turbulência, possam ser feitas.

O terreno, conforme apontam Levitan et al. (1990, p. 1038), é plano e aberto. A altitude muda a uma taxa muito pequena e não há nenhuma montanha ou depressão significativa a um raio de 30 km. A maior parte da terra ao redor é cultivada com plantações baixas. Os autores

afirmam que ventos fortes ocorrem durante todo o ano, apesar de não citarem a velocidade que os define.

O fato de que coeficientes de pressão em diversos pontos são fornecidos auxilia muito a validação de simulações experimentais e numéricas. Conforme explicam Bruno e Mancini (2002, p. 290), obter valores idênticos de coeficientes aerodinâmicos (por exemplo, coeficiente de arrasto) não garante a simulação correta do escoamento, enquanto o coeficiente de pressão permite a avaliação local da precisão dos resultados.

5.1 GERAÇÃO DA MALHA

Com todas as informações sobre a geometria disponíveis, a geração da malha do domínio computacional pôde ser feita. Foi dada preferência a malhas com volumes hexagonais, pequenos próximo às paredes, alinhados com a direção do escoamento, de lados de dimensões similares, sem faces adjacentes com dimensões muito diferentes e sem ângulos internos demasiadamente grandes ou pequenos. Idealmente, portanto, uma malha formada por cubos idênticos.

O domínio, por sua vez, deve ser suficientemente longo a barlavento do edifício para que variações no campo de velocidades geradas pela viscosidade não atinjam a entrada. A sotavento, deve permitir que a esteira de vórtices se desenvolva por completo. Nas demais dimensões, variações no campo de velocidades geradas por fenômenos aerodinâmicos também não devem atingir as fronteiras. A área da seção transversal deve ser suficientemente grande para que o obstáculo não crie acelerações grandes em todo o domínio por efeito Venturi. Após diversas simulações, Baetke et al. (1990, p. 134) chegaram à conclusão de que uma relação entre a área frontal do obstáculo e a área da seção transversal do domínio de aproximadamente 3% foi adequada para um caso similar ao estudado aqui.

Fica claro que para respeitar todos estes parâmetros, o domínio deve ter um número muito grande de volumes. Porém, limitações de tempo e nos recursos computacionais deste trabalho fazem com que seja recomendado um número máximo de, aproximadamente, um milhão de volumes. Tal limite não é absoluto, como pode ser visto no artigo de Mavriplis et al. (2009, p.

936) que trata de malhas de mais de 40 milhões de elementos e cita o uso de mais de 100 milhões.

Assim, utilizando volumes pequenos para satisfazer as condições de proximidade de paredes e homogêneos, para evitar grandes gradientes de forma, se for usada uma malha com Δx igual a um centímetro, um milhão de volumes resultaria em um domínio em forma de cubo com apenas um metro de lado. Por outro lado, ao se gerar uma região muito grande, ainda respeitando as condições de homogeneidade, se tivermos um domínio de 200 x 400 x 50 metros, Δx resultaria em 1,6 metro.

Ambos os casos ilustram as dificuldades encontradas ao gerar malhas. Deve-se buscar uma diferença entre as dimensões dos volumes próximos e distantes das paredes que não crie gradientes muito grandes e um domínio que não exija volumes em demasiado ou de dimensões muito elevadas. Assim, procura-se valores médios para ambos os parâmetros e estudos paramétricos são realizados para verificar se estes estão adequados.

A simplicidade da geometria do edifício da Texas Tech facilita muito o processo de geração de malhas, permitindo o uso de malhas estruturadas e formadas por hexaedros em todo o domínio. Não obstante, foram encontradas diversas dificuldades. Um dos problemas foi a encontrar casos similares na literatura, nos quais a malha estivesse adequadamente representada. Em muitos artigos estudados apenas o tamanho do domínio e/ou o número de elementos utilizados são fornecidos, sem representações gráficas da malha.

5.1.1 Avaliação da altura dos volumes adjacentes ao edifício

Inicialmente foram feitos domínios muito pequenos, com distância das faces do edifício às do domínio de ordem de H . Isto foi feito para ter uma idéia inicial do valor de y^+ , utilizando malhas estruturadas e de volumes de tamanho constante. Simulações foram realizadas para diversos tamanhos de volume, iniciando com $H/8$.

A partir dos primeiros resultados, foi percebido que volumes muito menores deveriam ser usados, visto que y^+ estava na ordem de 10^4 . Com isto, malhas de volumes menores, da ordem de $H/40$ foram geradas, mas mesmo com o domínio pequeno, com tamanho constante de volumes, números muito elevados de células computacionais eram geradas, tornando as

simulações muito dispendiosas. Estimativas nesta etapa apontaram para uma altura dos volumes adjacentes ao edifício de $H/400$.

5.1.2 Malha do tipo *O-Grid*

Após isto, malhas do tipo *O-Grid* foram geradas. Nestas, os volumes irradiam do obstáculo até as faces do domínio, como aros em uma roda, conforme a figura 4. Com isto, gradientes relativamente baixos podem ser usados, podendo gerar elementos pequenos próximos ao edifício e grandes distantes dele, mantendo as proporções destes quase constantes. Porém, um novo problema surgiu: ângulos internos muito grandes apareceram nas arestas do edifício, indicando que estas malhas são mais adequadas para obstáculos arredondados, quando o Método dos Volumes Finitos for utilizado.

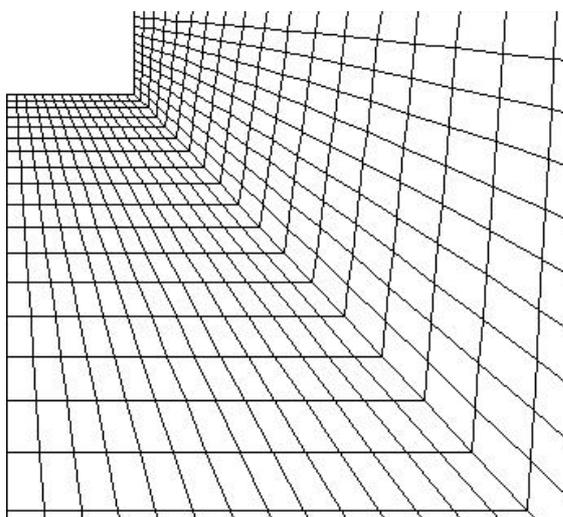


Figura 4: detalhe da *O-Grid*

5.1.3 Malha hexaédrica regular

Uma combinação dos casos anteriores foi feita, com um domínio grande em que na proximidade do edifício os volumes eram de tamanho constante e ao se afastar eles aumentavam com um gradiente pequeno, tentando manter uma razão entre os lados menor que 3. Como Selvam (1997, p. 649) obteve bons resultados utilizando malhas de $H/6$ na

proximidade do edifício por Diferenças Finitas, foram testados volumes com lado da ordem de $H/8$, mesmo com valores altos de y^+ e estes geraram resultados adequados.

Ao se reduzir esta dimensão, a fim de verificar a independência de malha, os valores obtidos variaram consideravelmente, indicando que a discretização era inadequada. De acordo com Selvam (1997, p. 655), isto pode ocorrer quando a pressão não é calculada na parede, e sim no centro do volume de controle adjacente.

5.1.4 Malha mista

Volumes tetraédricos foram utilizados para a transição entre os volumes grandes do domínio e os pequenos próximos ao edifício, como usado por Blocken et al. (2007a). A vantagem disso é a facilidade de lidar com transições na geometria de forma simples, como ilustrado na figura 5. No entanto, o gradiente de crescimento grande em um espaço pequeno resultou em uma malha de baixa qualidade, levando em conta a presença de mais de 700.000 volumes. Assim, se buscou uma opção que gerasse uma malha mais alinhada ao escoamento e com menos volumes de controle.

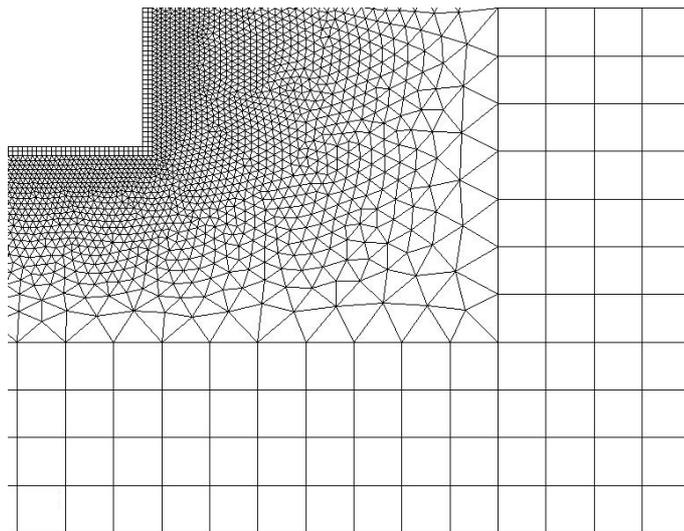


Figura 5: detalhe da malha mista

5.1.5 Malha hexaédrica alongada

Após verificar que diversas malhas que geraram resultados adequados apresentavam razão entre os lados das células (razão de aspecto) bastante elevada para Diferenças (TAMURA et al., 1990) e Elementos Finitos (BRAUN; AWRUCH, 2009), procurou-se construir uma malha estruturada, hexaédrica e com valores de y^+ coerentes com as recomendações feitas anteriormente, sem dar muita atenção ao fato de os volumes não serem aproximadamente cúbicos. Com isto, malhas com altura dos volumes no edifício de $H/400$ foram feitas, mantendo assim y^+ abaixo de 300. Tentou-se utilizar gradientes pequenos, mas volumes de tamanho elevado distantes do edifício, como mostra a figura 6. A largura dos volumes no edifício chega à ordem de $H/6$. Os resultados obtidos foram qualitativamente adequados, sem os erros visíveis presentes nas outras malhas. O número de volumes de controle ficou em 518.000.

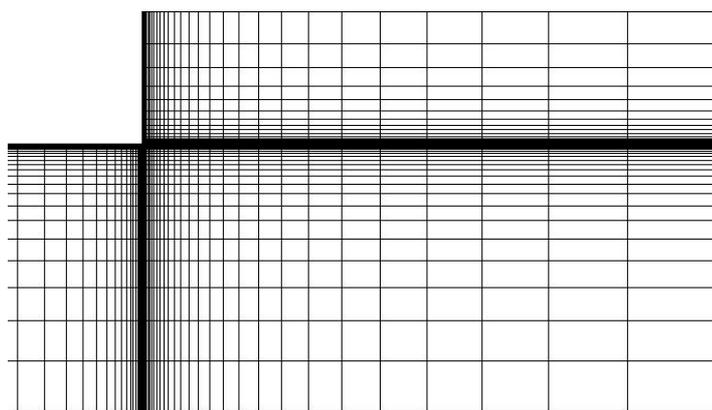


Figura 6: detalhe da malha com grande razão de aspecto

É relevante notar que as inadequações das malhas testadas foram verificadas sem haver necessidade de comparar os valores de pressões encontrados com os corretos. A facilidade de gerar visualizações do campo de velocidades permite que, qualitativamente, a veracidade das respostas encontradas seja analisada de forma rápida. Variações inexplicáveis neste campo indicam má qualidade das simulações. O processo de refinamento das malhas também possibilita a verificação de inadequações. Portanto, não é apenas em casos com resposta conhecida que se pode realizar esta análise de qualidade, o que é importante para o uso prático da CFD.

5.1.6 Dimensões do domínio de cálculo

O domínio gerado possui uma distância entre a entrada e o edifício de $5H$ e entre este e a saída de $15H$. Foi usada uma altura de $6H$ e uma distância entre o edifício e as paredes laterais de $5H$. Estas dimensões foram escolhidas a partir das recomendações compiladas por Franke et al. (2007, p. 16-18) e estão representadas na figura 7. O bloqueio, definido como a razão entre a área frontal do edifício e da seção transversal do domínio, resultou em cerca de 4%.

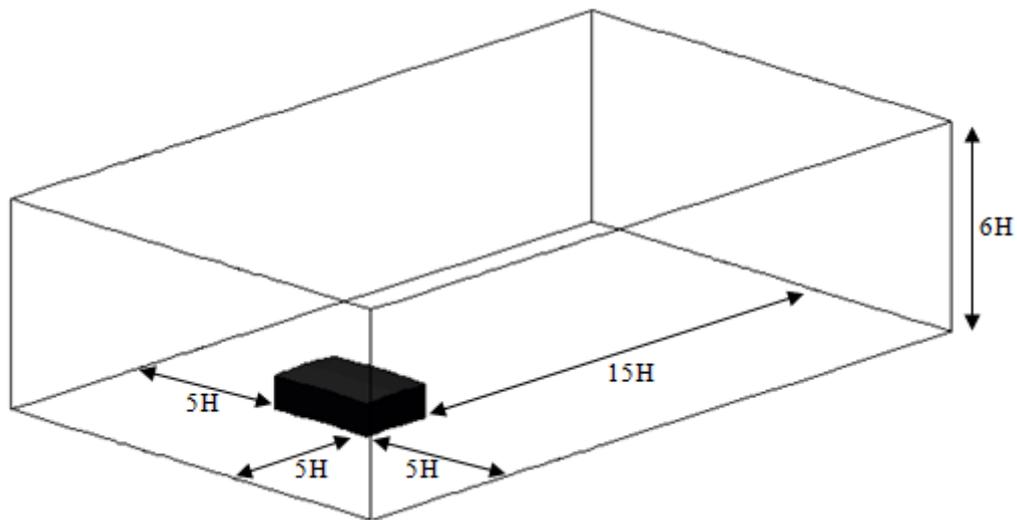


Figura 7: dimensões do domínio em função da altura do edifício

5.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A seguir são apresentadas as diversas condições de contorno usadas no domínio de cálculo.

5.2.1 Entrada

As condições de contorno do problema na entrada são dadas por Levitan et al. (1991, p. 231). O vento, que chega a 90° do edifício, soprando do ponto B para o ponto D, com uma variação de $\pm 10^\circ$. A intensidade de turbulência média é de 20% e a velocidade média U_{ref} é de 8,6 m/s no topo do edifício (gerando um número de Reynolds em função de H de $2,35 \times 10^6$) e o

expoente para o perfil de velocidades é, em média, 0,18. Na entrada do domínio é, portanto, gerado um perfil de velocidades com essas características, utilizando a equação 32:

$$u = U_{ref} \left(\frac{z}{H} \right)^{0,18} \quad (\text{equação 32})$$

A escala de comprimento longitudinal da turbulência não é fornecida no mesmo artigo, sendo usado um valor de 100 m, próximo aos encontrados no local por Letchford e Mehta (1993, p. 227) para ventos similares, mas de direções diferentes. Chok (1988, p. 84) definiu ser 104 m um valor médio para este parâmetro em uma zona que inclui ventos de até 70°.

O *software Fluent* aceita como dados de entrada para a turbulência a sua intensidade I_u e escala de comprimento L_u . Porém, após algumas simulações, foi visto que mesmo se um valor constante fosse inserido no programa, este aplicava variações grandes nos valores utilizados em função da altura z . Para obter maior controle sobre os parâmetros, foram programadas funções que representassem adequadamente o comportamento da turbulência na entrada. Para isto, I_u e L_u foram transformados em valores de k e ε e perfis foram gerados na entrada. Isto foi feito utilizando as equações 33 e 34, dadas por Fluent Incorporation (2005, seção 7.2.2):

$$k = 1,5(u.I_u)^2 \quad (\text{equação 33})$$

$$\varepsilon = C_\mu^{0,75} \frac{k^{1,5}}{L_u} \quad (\text{equação 34})$$

A intensidade de turbulência em função da altura foi calculada de acordo com o Eurocode 1-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2004, p. 22), para o local em que o edifício está inserido, a partir da equação 35. Isto gerou resultados quase idênticos aos obtidos no local por Levitan et al. (1991, p. 231) na direção de 90° e por Chok (1988, p. 79) nas demais:

$$I_u = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (\text{equação 35})$$

Foram feitas simulações com os perfis dados pelas equações apresentadas. Com isto se verificou que os valores de ε na entrada estavam demasiadamente baixos, sendo que estes aumentavam drasticamente assim que percorriam pequenas distâncias no domínio. Isto pode ocorrer devido ao uso de uma escala de comprimento grande, sendo que a equação 34 parece se referir a uma escala local. Se buscou outra fórmula para ε , uma que pudesse representar melhor o escoamento da camada limite atmosférica. Foi usada a equação 36, dada por Richards e Hoxey (1993, p. 147) para este tipo de problema, gerando um perfil mais homogêneo ao longo do domínio.

$$\varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa(z + z_0)} \quad (\text{equação 36})$$

A velocidade de fricção, segundo os autores, pode ser encontrada a partir da equação do perfil logarítmico da velocidade (equação 37), com z e u conhecidos. Assim, utilizando 0,42 para a constante de Karman, por recomendação dos mesmos autores, e com as condições de contorno da entrada, o valor de u_τ foi encontrado (aproximadamente 0,71 m/s). Os mesmos autores sugerem também uma equação para κ diferente da usada aqui, mas isto resulta em valores errados de intensidade de turbulência. Além disto, apesar de as equações finais representarem melhor a realidade do problema, os valores de κ e ε não parecem influir significativamente nos campos de pressão e velocidade, sendo que todas as equações apresentadas aqui geraram resultados quase idênticos.

$$u = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (\text{equação 37})$$

5.2.2 Topo

Um dos problemas que surgem na simulação numérica de escoamentos na camada limite atmosférica é que o perfil de velocidades gerado na entrada, assim como suas características de turbulência, deve ser constante ao longo do domínio até que se aproxime de um obstáculo. Segundo Hargraves e Wright (2007), usando o *Fluent*, esta condição não é respeitada. Os autores apontam que, usando funções de parede não equilibradas, alguns problemas são evitados, mas sugerem que outras funções sejam programadas para obter características de turbulência constantes ao longo do domínio.

Este procedimento não foi aplicado neste trabalho, visto que, como já comentado anteriormente, funções de parede não equilibradas geram bons resultados com o modelo k- ϵ RNG no escoamento em torno de corpos rombudos. Entretanto, os autores também citam a necessidade de aplicar uma tensão de cisalhamento no topo (céu) do domínio, na direção do vento, medida que não foi tomada nas primeiras simulações realizadas neste trabalho, onde se usou a condição de atrito zero. Esta recomendação foi dada inicialmente por Richards e Hoxey (1993, p. 151), que definem que o valor da tensão deve ser de $\rho \cdot u_{\tau}^2$

Além da condição de contorno inicial (sem atrito) e da citada acima, também foi utilizada uma terceira. Como em simulações feitas por Blocken et al. (2007b, p. 245), foi empregada velocidade e turbulência prescrita em todo o topo do domínio de cálculo. Seus valores são iguais aos aferidos no topo da entrada. Segundo os autores, este método evita gradientes na direção do escoamento, que estão presentes ao se aplicar alguns tipos de condições de contorno.

A partir destas condições diferentes, simulações foram realizadas a fim de averiguar qual gera os melhores resultados. O primeiro caso, sem atrito no topo do domínio, gerou a dissipação mais rápida da energia cinética turbulenta na direção x , com uma redução súbita na zona mais alta do domínio. A condição recomendada por Richards e Hoxey (1993) gerou uma melhoria significativa, mas uma queda abrupta de k na proximidade do topo se fez presente novamente. Este fenômeno só não ocorreu com o método usado por Blocken et al. (2007b), que manteve uma homogeneidade consideravelmente maior em todo o domínio.

A condição de velocidades e turbulência prescritas no topo do domínio foi, assim, adotada para o uso neste trabalho. Os campos de pressão e velocidade não foram alterados significativamente pelas modificações na condição de contorno do topo.

5.2.3 Fundo e edifício

No fundo (ou seja, no chão) e no edifício em si, são usadas paredes com condição *no-slip*, ou seja, com velocidade igual a zero. Enquanto o edifício possui a superfície lisa, a rugosidade aerodinâmica do terreno (z_0) deve ser levada em conta. Ela é, segundo Levitan et al. (1991, p. 231), 2.4 cm.

O *software Fluent* utiliza uma rugosidade equivalente de grão de areia k_s . Para encontrar este valor a partir de z_0 , utiliza-se a equação 38, fornecida para este *software* por Blocken et al. (2007b, p. 244), obtendo 47 cm. Fluent Incorporation (2005, seção 7.13.1) afirma que não há significado físico ter uma dimensão de malha tal que a célula adjacente à parede seja menor que k_s e sugere manter o centróide desta célula a uma distância da parede maior que k_s .

$$k_s = \frac{9,793 \cdot z_0}{C_s} \quad (\text{equação 38})$$

Onde:

C_s = constante de rugosidade (0,5, por *default*).

5.2.4 Demais condições de contorno

Nas paredes laterais do domínio é aplicada uma condição periódica, gerando uma comunicação entre elas. Isto faz com que variações no escoamento próximas às paredes não sejam imediatamente impedidas, quando o escoamento é assimétrico. Na saída, é definida uma pressão relativa nula e, ocorrendo reentrada do fluido, condições de turbulência iguais às da entrada são utilizadas

5.3 MÉTODOS NUMÉRICOS E DETALHES DO PROCESSAMENTO

Os resultados comentados até aqui foram obtidos utilizando os mesmos métodos numéricos. As simulações foram realizadas usando as equações na forma permanente, com o modelo k- ϵ RNG com funções de parede não equilibradas. Precisão dupla foi aferida às variáveis, a fim de evitar erros de truncamento. O processo iterativo foi feito até que os resíduos fossem cerca de 10^{-5} . O método QUICK foi utilizado para os termos advectivos e diferenças centrais para a pressão. O acoplamento pressão-velocidade foi feito pelo método PISO.

O processamento de todos os casos presentes neste trabalho foi realizado no Centro Nacional de Supercomputação, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foram utilizados quatro núcleos de 2.3 GHz em paralelo, com 128 GB de memória RAM para cada dois processadores, cada um com outros quatro núcleos. O número de núcleos foi definido pela limitação da licença do *software*. Na ausência deste fator, um número maior poderia ter sido usado para acelerar os cálculos.

Segundo Dorneles (2003, p. 19), para realizar processamento em paralelo, o domínio deve ser particionado entre os processadores. Este processo deve ser feito de modo a manter a carga de trabalho balanceada entre os processadores e a comunicação entre eles minimizada. Masuero (2009, p. 38) aponta que o particionamento por faixas é o que garante o número mínimo de fronteiras nos sub-domínios, ou seja, menor quantidade de processos de comunicação.

O domínio foi dividido em quatro faixas de espessuras diferentes (devido às taxas de crescimento dos volumes na direção do vento), mas procurando manter o mesmo número de volumes de controle em cada uma delas, visto que os núcleos utilizados são idênticos. Isto possibilitou que as duas faixas das extremidades possuíssem fronteira com apenas uma outra e as do meio com apenas duas, minimizando a comunicação entre os núcleos. Tal divisão pode ser vista na figura 8. Caso a divisão fosse feita na direção longitudinal, todos os sub-domínios teriam duas fronteiras, devido à condição de contorno periódica nas paredes laterais.

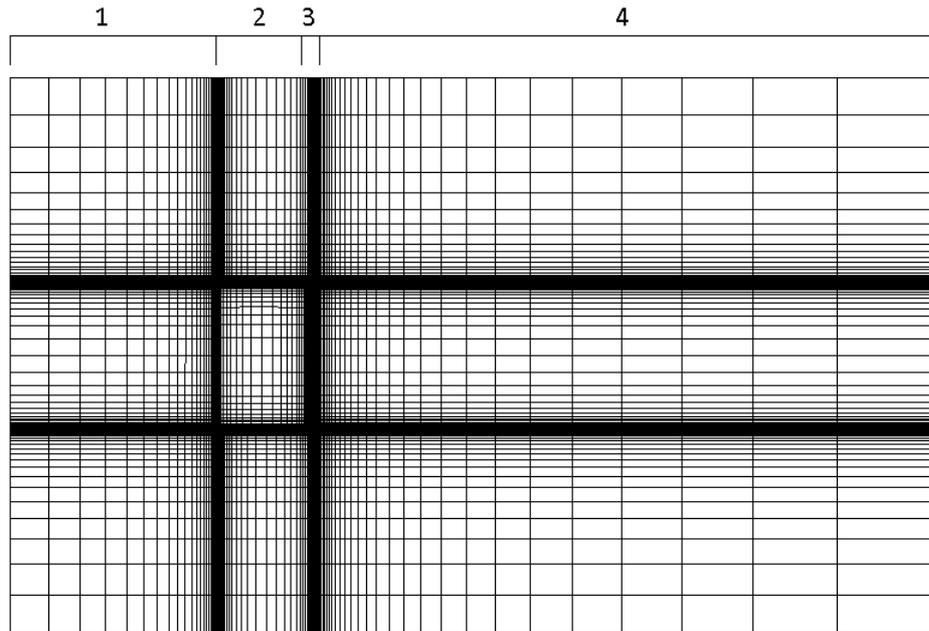


Figura 8: divisão da malha para o processamento em paralelo

5.4 VERIFICAÇÃO DA MALHA: EXTRAPOLAÇÃO DE RICHARDSON

A partir da malha que gerou resultados adequados, deve ser feita uma estimativa de erros, como comentado nos capítulos anteriores. Mais precisamente, os erros de discretização devem ser quantificados. Isto pode ser feito com a extrapolação de Richardson. Este processo é descrito por Ferziger e Peric (2002), Roache (1997) e Stern et al. (2001).

Inicia-se reduzindo e aumentando a malha criada em todas as direções por um fator r_k . Este fator pode ser diferente para as duas malhas geradas, mas simplifica os cálculos se for igual. Seu valor é, normalmente, definido como 2, para que pontos de mesmas coordenadas possam ser encontrados facilmente nas três malhas, mas os autores acima citados afirmam que este número é muito grande para casos práticos. Se for usado, a malha mais fina terá 8 vezes o número de volumes de controle da média e 64 vezes da grossa, resultando em cálculos muito onerosos. Há divergência entre os autores quanto ao menor fator entre as malhas que pode ser usado. Ferziger e Peric (2002) sugerem um valor mínimo de 1,5. Stern et al. (2001) afirmam que não existe um valor bem estabelecido e sugerem usar $2^{1/2}$. Roache (1998) mostra que para casos simples, r_k igual a 1,1 é adequado.

Para as malhas geradas neste trabalho, $r_k = 1,25$ foi usado para evitar malhas demasiadamente onerosas e arredondamentos (visto que a altura dos volumes adjacentes ao edifício é de 1 cm na malha média, isto se torna exatamente 0,8 cm e 1,25 cm nas outras). Três malhas foram feitas, uma mais fina, uma média (a inicial) e uma grossa, citadas de agora em diante como malhas 1, 2 e 3, respectivamente. A razão entre o número de volumes de controle das malhas 1 e 2, assim como da 2 e 3, é cerca de 1,95. Entre a 1 e a 3 é, aproximadamente, 3,81.

Segundo Stern et al. (2001, p. 797), para realizar a extrapolação de Richardson com três valores, deve ocorrer convergência monótona, ou seja, a razão entre os erros R_k , dada na equação 39, deve estar entre zero e um. A ordem do erro p_k é, segundo Roache (1997, p. 140), definida pela equação 40. Uma estimativa do erro de discretização da malha 2 pode ser feita, segundo Franke et al. (2007, p. 35), a partir da equação 41:

$$R_k = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_3 - \varphi_2} \quad (\text{equação 39})$$

$$p_k = \ln\left(\frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1}\right) / \ln(r_k) \quad (\text{equação 40})$$

$$\text{Erro}_2 = r_k^{p_k} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{r_k^{p_k} - 1} \quad (\text{equação 41})$$

Para este processo, os valores de φ usados são o coeficiente de pressão do ponto médio da aresta a barlavento do telhado (ponto B), que está situado em um nó da malha, não no centro de um volume, o que quer dizer que ele é obtido por interpolação feita pelo *software*, o que gera perda de precisão. Na malha 2, este resultou em -0,999. A partir das outras duas malhas, obteve-se $R_k = 0,4$ e $p_k = 3,97$, ou seja, um erro aproximadamente de quarta ordem. Com isto, o erro para a malha inicial foi calculado e o valor obtido foi de -0,050, ou seja, uma variação de 5%, um valor bastante baixo para cálculos de Engenharia. O erro da malha mais refinada

por sua vez, ficou igual a 2,1%. Novamente, a análise de erros foi feita sem necessidade de saber os valores corretos das variáveis.

5.5 SIMULAÇÃO TRANSIENTE

Além das simulações permanentes utilizando o modelo k- ϵ , também foi utilizada LES transiente. Para isto, se usou discretização temporal de segunda ordem, o método PISO de acoplamento pressão-velocidade e *Bounded* CDS para a interpolação dos termos advectivos. O modelo SGS de Smagorinsky foi utilizado com sua constante igual a 0,1. O resíduo permitido para assumir a convergência de um passo de tempo foi de 10^{-4} para todas as variáveis. Os demais parâmetros foram idênticos aos empregados anteriormente. Os resultados obtidos por k- ϵ foram usados como os valores iniciais das variáveis.

Ao se utilizar LES, muito mais tempo de cálculo é necessário, como já comentado nos capítulos anteriores. A simulação é monitorada pelos coeficientes de força globais no sentido longitudinal e transversal. Nos primeiros passos de tempo, os coeficientes apresentam andamento incoerente, devido a erros numéricos. Após um certo período, se observam variações de acordo com o escoamento, com picos e depressões associados a desprendimento de vórtices, em escalas variadas. A partir destas simulações, pode-se realizar uma análise estatística do escoamento.

5.5.1 Modificação da malha

Como comentado anteriormente, ao se utilizar LES, malhas mais finas devem ser utilizadas para que os vórtices mais relevantes do escoamento possam ser calculados corretamente. Pela própria natureza do método, não foi feita a extrapolação de Richardson. Ao se reduzir a malha neste caso, o tamanho do filtro utilizado é reduzido, alterando as escalas de turbulência que estão sendo simuladas e as calculadas diretamente, modificando o método numérico. Por este motivo, uma análise mais qualitativa foi feita.

Inicialmente, a malha usada no cálculo em k- ϵ foi testada com LES. Observando campos de velocidade em diversos planos no domínio em tempos diferentes, se viu que os vórtices a

sotavento e aos lados do edifício eram da mesma ordem de grandeza de alguns volumes de controle. Com isto, um refinamento da malha foi necessário.

A malha foi modificada aumentando o número de volumes de controle, a fim de reduzir o tamanho destes na proximidade do edifício, onde a simulação correta dos vórtices é mais importante, conforme a figura 9. O valor de y^+ foi mantido constante, visto que uma redução significativa deste resultaria em um aumento no custo computacional demasiadamente grande. Foram usados 984.300 volumes de controle na malha final usada com LES, um número relativamente elevado e que resultou em tempos de processamento muito maiores que aqueles necessários para a malha usada nas simulações em $k-\epsilon$.

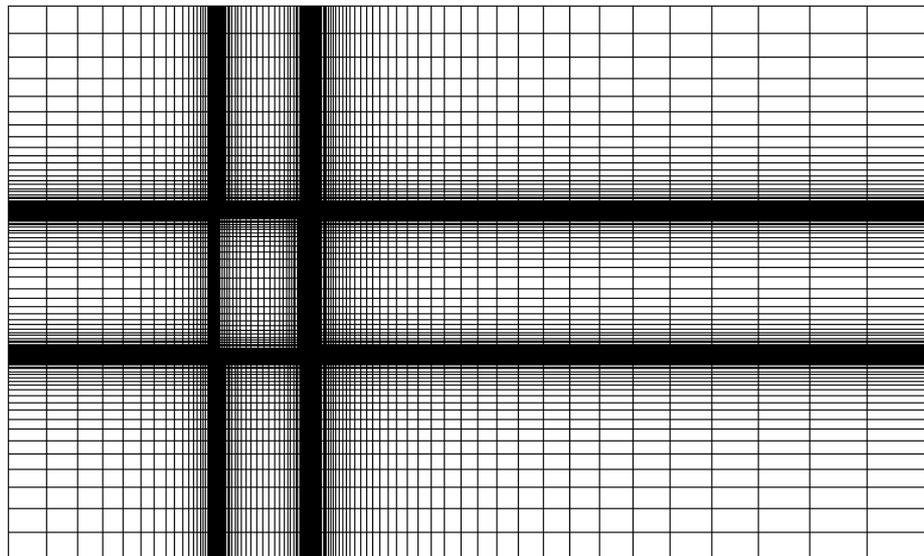


Figura 9: malha usada com LES

Se DNS fosse usada, o número de volumes de controle aumentaria drasticamente. Como uma estimativa, se toma a escala de Kolmogorov para este problema, usando o valor de ϵ na altura de 4m entrada, que resulta em cerca de 10^{-4} m. Levando em conta o que o volume do domínio de cálculo é aproximadamente 10^5 m³, no total seriam usadas mais de 10^{15} células de cálculo.

5.5.2 Geração de turbulência na entrada

A geração adequada de turbulência na entrada do domínio para LES é um tema ainda em aberto da CFD. Diversos métodos estão presentes na literatura. Os mais frequentemente

encontrados são divididos em dois grupos: os que utilizam dados de outras simulações e os que geram flutuações no campo de velocidades por algoritmos.

O primeiro grupo utiliza métodos análogos ao que se usa em túneis de vento. Lund et al. (1998) desenvolveram a técnica em que se gera um escoamento de camada limite em um domínio auxiliar. A simulação deste escoamento é acelerada “reciclando” o campo de velocidades turbulento próximo à saída e reintroduzindo-o na entrada, possibilitando a utilização de um domínio de cálculo auxiliar de comprimento reduzido. O campo de velocidades transiente resultante é fisicamente realista e pode ser utilizado na entrada do problema que se deseja resolver.

O segundo grupo utiliza algoritmos para gerar variações anisotrópicas na velocidade na entrada do domínio. Várias formas de fazer isto estão disponíveis. Kondo et al. (1997), por exemplo, utilizam números aleatórios e fatores prescritos sobre o espectro da turbulência. Métodos deste tipo possuem a clara vantagem de serem de implementação mais simples e de requererem tempos de simulação muito inferiores aos do primeiro grupo.

O método utilizado neste trabalho pertence ao segundo grupo. Smirnov et al. (2001) desenvolveram esta técnica, que consiste na geração de um escoamento aleatório, escalando e transformando ortogonalmente um campo de fluxo gerado como uma sobreposição de funções harmônicas. O método está disponível no *software Fluent*, não havendo necessidade de implementá-lo para uso neste trabalho. Seus dados de entrada são os mesmos usados nas simulações permanentes: \mathbf{I}_u e \mathbf{L}_u ou \mathbf{k} e ε .

5.5.3 Análise do passo de tempo

Como já dito, o passo de tempo escolhido em uma simulação transiente deve respeitar as escalas que se deseja calcular. Para isto, inicialmente se utilizou o critério de manter o número de Courant menor que a unidade em todo o domínio. Isto resultou em, aproximadamente, 5×10^{-4} s. Um passo de tempo tão pequeno fez com que o tempo de processamento se tornasse bastante elevado. Por este motivo, e seguindo as recomendações das empresas responsáveis por *softwares* comerciais implícitos, foi testado um valor menos conservador para acelerar os cálculos.

Assim, o passo de tempo foi elevado a 5×10^{-3} s, gerando números de Courant próximos a 10 nas regiões mais desfavoráveis. Isto fez com que, para simulações com fluxo laminar na entrada, o andamento dos coeficientes globais de força se alterassem ligeiramente, apresentando menos variação nas frequências mais elevadas, como esperado. Porém, ao se comparar os coeficientes de pressão médios e RMS no edifício, o primeiro não variou e o segundo apenas em proporções muito reduzidas.

Ao se comparar os coeficientes globais, em simulações com geração de turbulência na entrada do domínio, estes apresentaram uma variação maior do que no caso laminar. Tal fato deve ocorrer pelas flutuações no campo de velocidades na entrada serem geradas com um espaçamento dez vezes maior no segundo caso, alterando o espectro da turbulência incidente no edifício.

Após os testes referentes ao número de Courant, foi visto o passo necessário para simular as escalas de tempo da turbulência. Segundo CD-adapco (2009, seção 16), isto pode ser feito verificando a relação k/ϵ no domínio. Após a criação desta função e seu cálculo no resultado das simulações permanentes, foi visto que a menor escala de tempo em todo o domínio encontrada foi ligeiramente superior a 2×10^{-3} s. A fim de respeitar esta condição e dando maior importância às frequências mais baixas do espectro de turbulência, este número foi adotado como passo de tempo nas simulações transientes.

O passo de tempo necessário, se fosse usada DNS, seria significativamente menor. Como a aresta dos volumes seria cem vezes menor que a menor dimensão da malha utilizada em LES, para obter o mesmo número de Courant o passo de tempo seria cem vezes menor. Para respeitar a escala de tempo de Kolmogorov (igual à raiz quadrada da razão ν/ϵ), ele deveria ser reduzido para cerca de 10^{-9} s.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS FORMAS DE MODELAGEM

Conforme foi visto ao longo deste trabalho, os diferentes métodos de modelagem da turbulência requerem discretização espacial e temporal consideravelmente diferentes. Isto faz com que o tempo de processamento necessário para cada método seja de ordens de grandeza diferentes. No quadro 1 estão representadas as exigências de discretização para RANS, LES e

DNS para o caso estudado, com os mesmos recursos computacionais. Os valores representam a ordem de grandeza do número de volumes de controle, do tamanho do passo de tempo e do tempo de processamento necessário para cada método. Para DNS, a discretização foi estimada com as escalas de Kolmogorov. Tomando como referência a malha usada para LES, o passo de tempo de DNS resultaria em um tempo de processamento cerca de um milhão de vezes maior que o necessário para LES, chegando à ordem de grandeza de milênios. Levando em conta que a malha para DNS teria um bilhão de vezes o número de volumes da malha usada em LES, mesmo ignorando a necessidade de um aumento enorme na memória RAM e no espaço em disco, o tempo de processamento para DNS no caso estudado, com os recursos computacionais usados, se torna um valor inexecutável.

| | Número de volumes | Passo de tempo | Tempo de processamento |
|------|-------------------|----------------|------------------------|
| RANS | 10^5 | - | horas |
| LES | 10^6 | 10^{-3} | dias |
| DNS | 10^{15} | 10^{-9} | impraticável |

Quadro 1: comparação das discretizações e do tempo de processamento para RANS, LES e DNS para o caso estudado

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir das diversas simulações descritas no capítulo anterior.

6.1 SIMULAÇÕES PERMANENTES

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos utilizando as equações na forma RANS e o modelo de turbulência k- ϵ RNG.

6.1.1 Perfil de velocidades

O perfil de velocidades inserido na entrada do domínio (equação 32) é apresentado na figura 10. Ele é comparado com o perfil obtido a uma distância de 3H da entrada.

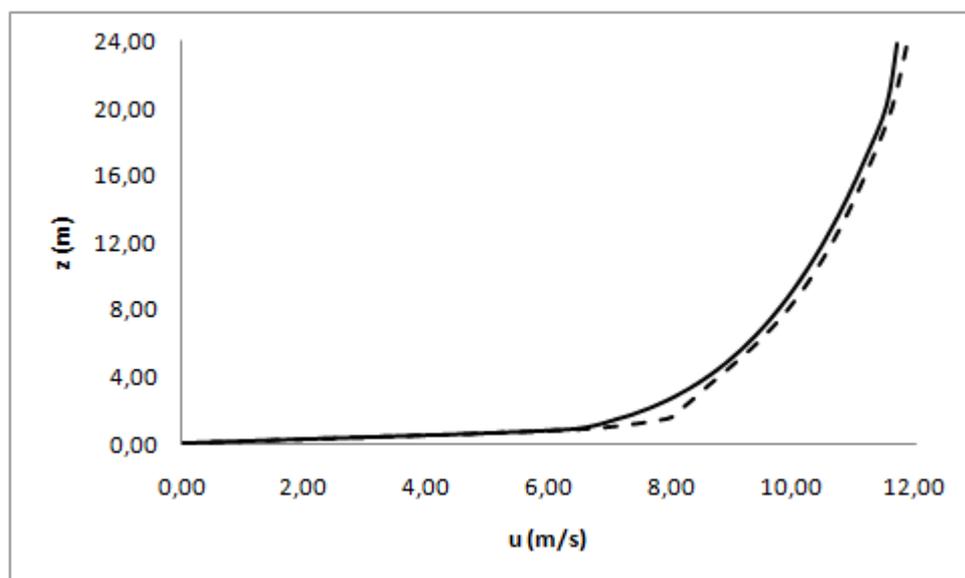


Figura 10: perfis de velocidade na entrada (linha cheia) e após 3H (linha tracejada)

O perfil de velocidades não se manteve ao longo do domínio, se deformando antes de atingir o edifício. Tal comportamento é esperado, já tendo sido comentado anteriormente que Hargraves e Wright (2007) afirmam que isto ocorre no *software Fluent*. Ambos perfis foram medidos nas faces laterais do domínio, a fim de evitar interferência do edifício. O desvio da realidade ocorrido pode gerar resultados imprecisos. A qualidade destes é avaliada a seguir.

6.1.2 Coeficientes de pressão médios

Coeficientes de pressão (C_p) médios obtidos foram comparados com os valores de campo apresentados por Levitan et al. (1991, p. 232), conforme a figura 11.

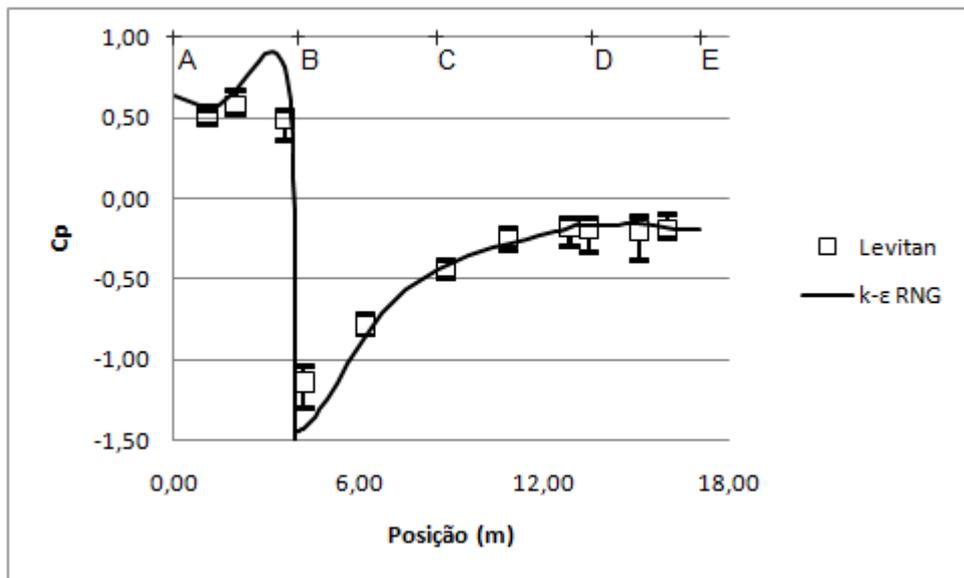


Figura 11: comparação dos coeficientes de pressão médios na linha central do edifício

Observa-se uma concordância entre os valores corretos e os obtidos numericamente. Pequenas diferenças ocorrem em torno do ponto B, onde há um maior gradiente na pressão devido à transição de sobre pressão para sucção. Este ponto, assim como o ponto D, apresenta variações nas medidas de campo, sendo que ambos representam as maiores descontinuidade da linha média ABCDE.

6.2 SIMULAÇÕES TRANSIENTES

As simulações transientes se apresentaram mais complexas que as permanentes, gerando resultados flutuantes, que requerem um tratamento estatístico. Alguns destes são apresentados aqui.

6.2.1 Andamento dos coeficientes de força globais

Como comentado anteriormente, os coeficientes de força globais foram utilizados como parâmetro para avaliar a qualidade dos resultados obtidos. Os primeiros segundos calculados apresentam variações grandes nestes coeficientes e são descartados. A partir do ponto em que estes passam a apresentar um andamento mais coerente, a análise estatística do escoamento começa a ser feita. Um exemplo deste comportamento pode ser visto na figura 12, que apresenta o coeficiente de força na direção do escoamento. O coeficiente de força na direção perpendicular ao vento, paralela ao chão, também foi analisado e a análise estatística só foi iniciada após a estabilidade de ambos

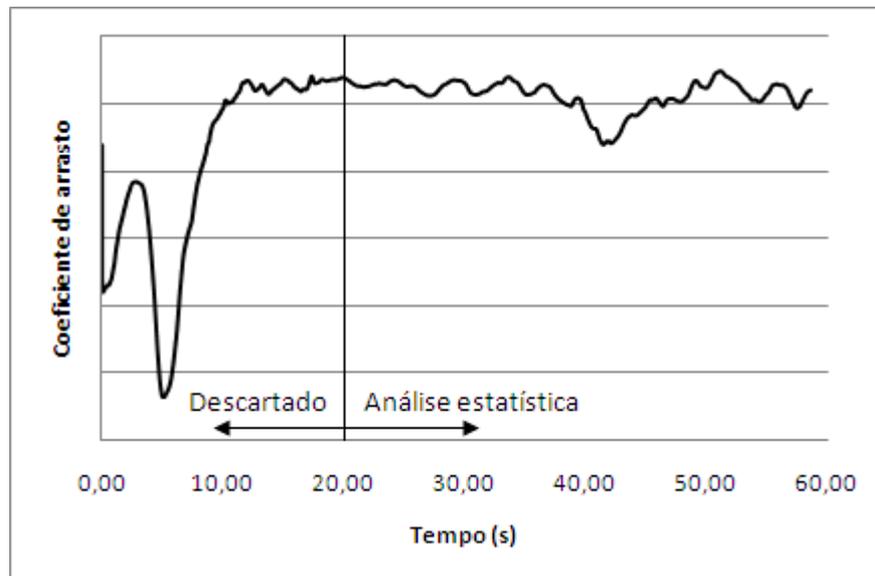


Figura 12: andamento do coeficiente de arrasto do edifício em função do tempo

6.2.2 Desvio padrão dos coeficientes de pressão

A partir das simulações transientes, sem geração de turbulência na entrada do domínio, foi calculado o desvio padrão dos coeficientes de pressão em todo o domínio de cálculo. Estes foram comparados com os valores de campo apresentados por Levitan et al. (1991, p. 232), conforme a figura 13. Os valores de campo foram obtidos por medições feitas ao longo de 15 minutos a 10 Hz, enquanto os resultados numéricos foram medidos por 10 segundos a 500 Hz. Tal diferença no período de medição e na frequência de tomada dos dados deve gerar variações no resultado final.

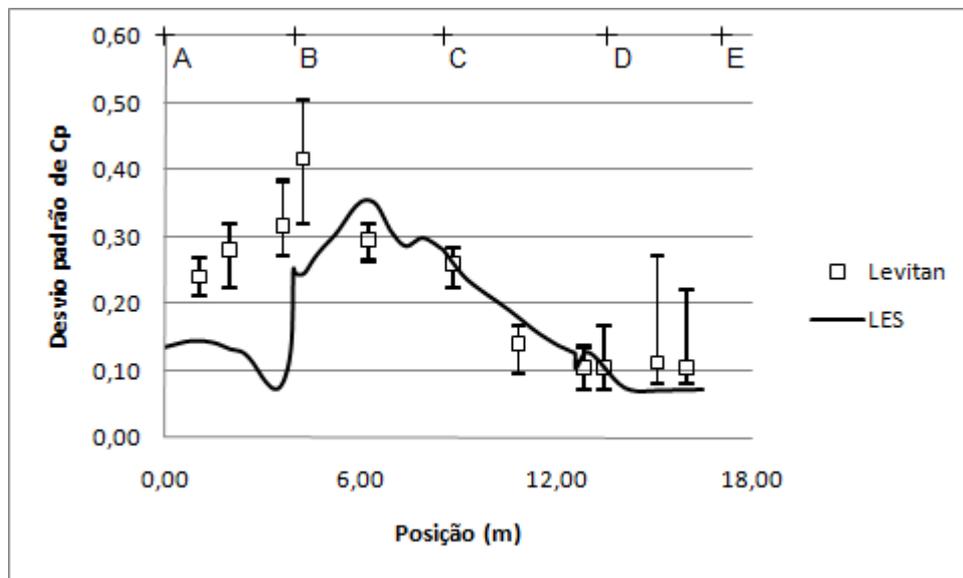


Figura 13: comparação do desvio padrão dos coeficientes de pressão na linha central do edifício

Percebe-se que na segunda metade do edifício há um bom acordo entre a simulação numérica e os valores de referência. Na primeira metade, no entanto, os valores obtidos por LES estão muito abaixo dos corretos. Isto deve ocorrer devido ao fato de o vento na entrada do domínio ser laminar nas simulações numéricas, enquanto que, no caso real, há uma certa turbulência na camada limite atmosférica.

A intensidade de turbulência I_u na altura do edifício nos dados de referência é de 20%. No caso dos resultados acima, o escoamento na entrada é dado por velocidades constantes, ou seja, I_u nulo. No entanto, o gradiente de velocidades dado pela camada limite atmosférica gera

flutuações na velocidade. Medindo I_u nas faces laterais do domínio na altura do edifício, este resultou em cerca de 1,5%, um valor ainda bem abaixo do desejado.

Simulações adicionais foram realizadas com o uso de um algoritmo dado por Smirnov et al. (2001) para gerar turbulência na entrada do domínio. A intensidade de turbulência na entrada resultou em cerca de 9,7%, bem abaixo dos 20% prescritos. Além disto, grandes variações na velocidade na direção paralela ao chão e perpendicular ao escoamento foram encontradas. Estes fatores indicam que tal algoritmo não é adequado para o uso na Engenharia do Vento Computacional. Não obstante, os resultados obtidos com ele são apresentados na figura 14.

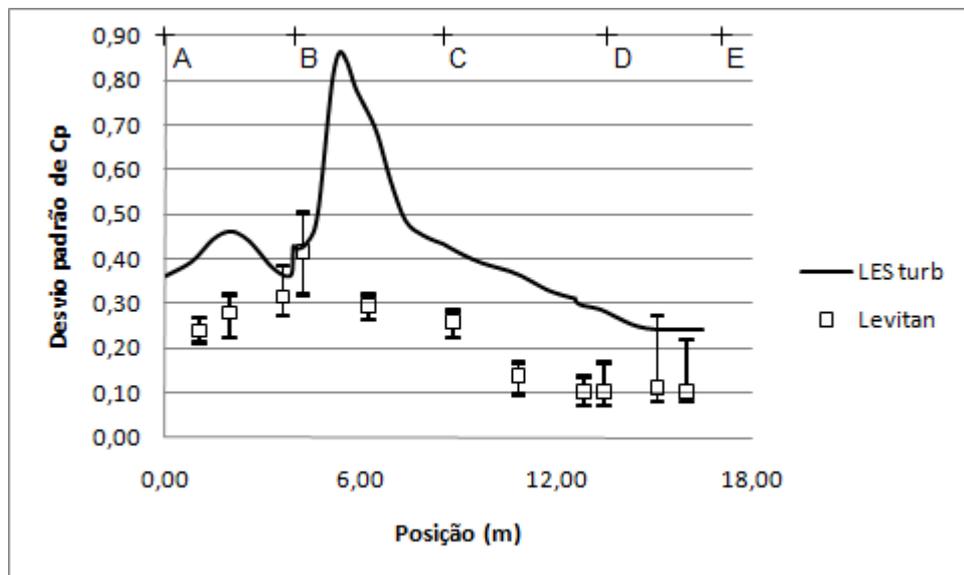


Figura 14: comparação do desvio padrão dos coeficientes de pressão na linha central do edifício com geração de turbulência na entrada do domínio

Os valores do desvio padrão do coeficiente de pressão estão muito acima dos corretos na maior parte da linha central do edifício. Apesar de os resultados obtidos com geração de turbulência na entrada do domínio serem equivocados, servem para mostrar a forte dependência do valor flutuante do coeficiente de pressão à variações na velocidade. Assim, isso indica que com o uso de métodos para geração de turbulência mais adequados, é possível chegar a valores mais realistas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho foram feitas diversas simulações numéricas para verificar a precisão das forças devidas ao vento que podem ser obtidas através da Dinâmica dos Fluidos Computacional. Os cálculos foram feitos em um edifício baixo, com número de Reynolds de $2,35 \times 10^6$ e os resultados foram comparados com valores obtidos experimentalmente em escala real. O objetivo principal do trabalho foi cumprido, tendo sido avaliada a precisão dos resultados. Estes foram bastante satisfatórios em termos de coeficientes de pressão médios. O modelo k- ϵ RNG apresentou resultados muito próximos aos obtidos em escala real.

Os valores flutuantes do coeficiente de pressão se mostraram fortemente dependentes da turbulência na entrada do domínio. Limitações de tempo não permitiram a análise aprofundada dos diversos métodos disponíveis para gerar a turbulência da camada limite atmosférica. Esta fica como uma sugestão para trabalhos futuros: realizar simulações transientes com geração adequada de turbulência na entrada. Modelos diferentes de submalha podem ser testados, principalmente os dinâmicos, que devem gerar resultados mais precisos. Estudos recentes citados neste trabalho indicam que é possível obter resultados flutuantes corretos com LES ao se utilizar variações na velocidade de entrada similares às encontradas na realidade.

Diversas recomendações para uso da CFD na Engenharia do Vento Computacional foram feitas ao longo do trabalho. Algumas, como a escolha dos esquemas de interpolação, foram obtidas da literatura. Certas escolhas, como a das condições de contorno mais adequadas, foram deduzidas a partir dos estudos paramétricos realizados. A avaliação da qualidade da malha foi apresentada através da aplicação da mesma em um exemplo específico. A impossibilidade do uso de DNS para problemas práticos foi mostrada com exemplos de aplicações hipotéticas no caso trabalhado. Com isto, foram cumpridos os objetivos secundários, possibilitando que o que foi apresentado neste trabalho seja utilizado como referência na realização de cálculos similares. Manuais de boas práticas na CWE não são comuns, dificultando o acesso a esta área.

Outra recomendação para futuros trabalhos é que seja realizada a simulação de uma estrutura de geometria mais complexa e em meio urbano, a fim de verificar o uso da CWE como ferramenta comercial. Serão necessários dados confiáveis para comparação de resultados. No caso de dispersão de poluentes e conforto de pedestres, tais simulações poderiam ser feitas no regime permanente, a fim de acelerar os cálculos, visto o grande número de volumes de controle que seriam necessários. Na verificação de forças devidas ao vento, necessariamente seria utilizado regime transiente, para obter valores de pico. Isto acarretaria em recursos computacionais muito mais elevados, um problema que deve diminuir com o passar do tempo.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics: the basics with applications**. Singapore: McGraw-Hill, 1995.
- ANSYS, INCORPORATION. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. Canonsburg, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- BAETKE, F.; WERNER, H.; WENGLER, H. Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 35, p. 129-147, Sept. 1990.
- BERGER, S. A. Equations of motion and potential flow. In: KREITH, F. (Ed.) **Mechanical Engineering Handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- BLOCKEN, B.; CARMELIET, J.; STATHOPOULOS, T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings: effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 95, n. 9-11, p. 941-962, Oct. 2007a.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v. 41, n. 2, p. 238-252, Jan. 2007b.
- BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. **Computers & Structures**, Amsterdam, v. 87, n. 9-10, p. 564-581, May 2009.
- BRUNO, L.; KHRIS, S. On the validity of 2D numerical simulations of vortical structures around a bridge deck. **Mathematical and Computer Modelling**, Oxford, v. 37, n. 7-8, p. 795-828, Apr. 2003.
- BRUNO, L.; KHRIS, S.; MARCILLAT, J. Contribution of numerical simulation for evaluation of the effect of section details and partial streamlining on the aerodynamic behaviour of bridge decks. **Wind and Structures**, Yuseong-gu Daejeon, v. 4, n. 4, p. 315-332, 2001.
- BRUNO, L.; MANCINI, G. The importance of Deck Details in Bridge Aerodynamics. **Structural Engineering International**, Zurich, v. 4, p. 289-294, 2002.
- CD-ADAPCO. **CCM Tutorials: STAR-CD version 4.10**. Melville, 2009.
- CHOK, C. V. **Wind parameters of Texas Tech University field site**. 1988. 90 f. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – Department of Civil and Environmental Engineering. Texas Tech University, Lubbock.

- COCHRAN, L. State of the Art Review of Wind Tunnels and Physical Modelling to Obtain Structural Loads and Cladding Pressure. **Architectural Science Review**, Sydney, v. 49, n. 1, p. 7-16, Mar. 2006.
- DORNELES, R. V. **Particionamento de Domínio e Balanceamento de Carga no Modelo HIDRA**. 2003. 136 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **prEN 1991-1-4**: Eurocode 1 – Actions on structures – General actions – Part 1-4: Wind actions. 2004.
- FERZIGER, J. H. Approaches to turbulent flow computation: applications to flow over obstacles. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 35, p. 1-19, Sept. 1990.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3rd ed. rev. Berlin: Springer, 2002.
- FLUENT INCORPORATION. **Fluent 6.3 User's Guide**. Lebanon, USA, 2005.
- FOX, R. W.; MCDONALD A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introduction to Fluid Mechanics**. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.
- FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. **COST Action 732**: Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. Brussels, 2007.
- GERMANO, M.; PIOMELLI, H.; MOIN, P.; CABOT, W. H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. **Physics of Fluids**, Maryland, v. A 3, n. 7, p. 1760-1765, Jul. 1991.
- GOSMAN, A. D. Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 81, n. 1-3, p. 21-39, May 1999.
- HARGREAVES, D. M.; WRIGHT, N. G. On the use of the k- ϵ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 95, n. 5, p. 355-369, May 2007.
- KIM, W. -W.; MENON, S. Application of the localized dynamic subgrid-scale model to turbulent wall-bounded flows. In: AEROSPACE SCIENCES MEETING, 35th, 1997, Reno. **Technical Report AIAA-97-0210**, Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- KONDO, K.; MURAKAMI, S.; MOCHIDA, A. Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 67-68, p. 51-64, Apr.-June 1997.
- KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. **Fluid Mechanics**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2002.
- LAROSE, G. L.; D'AUTEUIL, A. On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 94, n. 5, p. 365-376, May 2006.

- LETCHFORD, C. W.; MEHTA, K. C. The distribution and correlation of fluctuating pressures on the Texas Tech building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 50, p. 225-234, Dec. 1993.
- LEVITAN, M. L.; MEHTA, K. C. Texas Tech field experiments for wind loads part 1: building and pressure measuring system. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 43, p. 1615-1616, Oct. 1992.
- LEVITAN, M. L.; MEHTA, K. C.; CHOK, C. V.; MILLSAPS, D. L. An overview of Texas Tech's wind engineering field research laboratory. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 36, p. 1037-1046, Oct. 1990.
- LEVITAN, M. L.; MEHTA, K. C.; VANN, W. P.; HOLMES, J. D. Field measurements of pressure on the Texas Tech Building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 38, n. 2-3, p. 227-234, July-Aug. 1991.
- LILLY, D. K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. **Physics of Fluids**, Maryland, v. A 4, n. 3, p. 633-635, Mar. 1992.
- LIM, H. C.; CASTRO, I. P.; HOXEY, R. P. Bluff bodies in deep turbulent boundary layers: Reynolds-number issues. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 571, p. 97-118, 2007.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Eds.) **Turbulência**: volume 4. Rio de Janeiro: ABCM, 2004.
- LUND, T. S.; WU, X.; SQUIRES, K. D. Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulations. **Journal of Computational Physics**, Amsterdam, v. 149, n. 2, p. 233-258, Mar. 1998.
- MALISKA, C. R.. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- MASUERO, J. R. **Computação paralela na análise de problemas de engenharia utilizando o Método dos Elementos Finitos**. 2009. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MAVRIPLIS, D.; VASSBERG, J. C.; TINOCO, E. N.; MANI, M.; BRODERSEN, O. P.; EISFELD, B.; WAHLS, R. A.; MORRISON, J. H.; ZICKUHR, T.; LEVY, D.; MURAYAMA, M. Grid Quality and Resolution Issues from the Drag Prediction Workshop Series. **Journal of Aircraft**, Reston, v. 46, n. 3, p. 935-950, May-June 2009.
- MOIN, P.; MAHESH, K. Direct Numerical Simulation: a tool in turbulence research. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 30, p. 539-578, 1998.
- NIEMANN, H. -J. The boundary layer wind tunnel: an experimental tool in building aerodynamics and environmental engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 48, n. 2-3, p. 145-161, Oct. 1993.

PETRY, A. P. **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**. 2002. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RICHARDS, P. J.; HOXEY, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 46-47, p. 145-153, Aug. 1993.

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 29, p. 123-160, 1997.

ROACHE, P. J. **Verification and Validation in Computational Science and Engineering**. Socorro, USA: Hermosa, 1998.

RODI, W. Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 69-71, p. 55-75, July-Oct. 1997.

SELVAM, R. P. Computation of pressures on Texas Tech University building using large eddy simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 67-68, p. 647-657, Apr.-June 1997.

SMAGORINSKY, J. General Circulation Experiments With The Primitive Equations: I. the basic experiment. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 91, n. 3, p. 99-164, Mar. 1963.

SMIRNOV, A.; SHI, S.; CELIK, I. Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling. **Journal of Fluids Engineering**, Fairfield, v. 123, n. 2, p. 359-371, June 2001.

SOLARI, G.; PICCARDO, G. Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting on structures. **Probabilistic Engineering Mechanics**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 73-86, Jan. 2001.

STATHOPOULOS, T. Computational wind engineering: past achievements and future challenges. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 67-68, p. 509-532, Apr.-June 1997.

STERN, F.; WILSON, R. V.; COLEMAN, H. W.; PATERSON, E. G. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations: Part 1: methodology and procedures. **Journal of Fluids Engineering**, Fairfield, v. 123, n. 4 p. 793-802, Dec. 2001.

TAMURA, T. Towards practical use of LES in wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 96, n. 10-11, p. 1451-1471, Oct.-Nov. 2008.

TAMURA, T.; OHTA, I.; KUWAHARA, K. On the reliability of two-dimensional simulation for unsteady flows around a cylinder-type structure. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 35, p. 275-298, Sept. 1990.

TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLETCHER, R. H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 2nd ed. Washington: Taylor & Francis, 1997.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 2nd ed. La Cañada: DCW Industries, 1998 (impressão 2002).

YAKHOT, V.; ORSZAG, S. A.; THANGAM, S.; GATSKI, T. B.; SPEZIALE, C. G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids**, Maryland, v. A 4, n. 7, p. 1510-1520, July 1992.

YEATTS, B. B.; MEHTA, K. C. Field experiments for building aerodynamics. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 50, p. 213-224, Dec. 1993.