



INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO AO REDOR DE DOIS CILINDROS ROMBUDOS DE BASE QUADRADA EM DIFERENTES DISPOSIÇÕES DE GEOMETRIA EM RELAÇÃO AO ESCOAMENTO

Vincius Souza Morais
vviniuss@dem.feis.unesp.br

Mateus Calegari Paulique
mateuspaulique@gmail.com

William H. K. Pereira
whkpereira@gmail.com

Eduardo F. Mega
eduardomega@dem.feis.unesp.br

Sérgio Said Mansur
mansur@dem.feis.unesp.br

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP – Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

Resumo: *Quando um fluido escoar em torno de um corpo cilíndrico, uma região perturbada surge a jusante do obstáculo. A extensão desta região e a magnitude das instabilidades ali presentes dependem de vários fatores, tais como a forma geométrica, a orientação e as dimensões do cilindro. Em situações de interesse prático, dois ou mais corpos são colocados suficientemente próximos, de tal forma que o escoamento ao redor de cada um deles interfere no escoamento em torno dos corpos adjacentes. Este trabalho apresenta uma simulação numérica do escoamento ao redor de um par de cilindros de base quadrada, afastados entre si de uma distância d , e dispostos de maneira que a linha imaginária que une os dois corpos forme diferentes ângulos θ com a direção do escoamento. Para um determinado arranjo, a influência de Reynolds sobre Strouhal e as alterações na estrutura do escoamento é avaliada. Como ferramenta de trabalho, foi utilizado o programa de simulação Fluids_1.0, que resolve as equações de Navier-Stokes 2D em coordenadas cartesianas, empregando o método volumes finitos. As simulações foram realizadas para números de Reynolds inferiores a 1000 sem a presença de bloqueio sólido. Os resultados numéricos foram comparados com dados da literatura e resultados experimentais.*

Palavras-chave: *Mecânica dos Fluidos, Simulação Numérica, Escoamento Externo, Corpos Rombudos.*

1. INTRODUÇÃO

Apesar de constituir um problema clássico da mecânica dos fluidos, o escoamento ao redor de corpos rombudos apresenta um caráter desafiador, devido à sua alta complexidade. Embora estudado há mais de um século, muitos dos fenômenos presentes neste tipo de escoamento permanecem, ainda hoje, mal compreendidos.

Do ponto de vista prático, diversas estruturas empregadas na engenharia funcionam como corpos rombudos imersos em escoamentos de fluidos. Por exemplo, pilares de pontes da engenharia civil; tirantes e longarinas de asas da engenharia aeronáutica; cabos de transmissão da engenharia de infra-estrutura elétrica; elementos externos de automóveis da engenharia automotiva; linhas de ancoragem da engenharia naval; plataformas e tubulações da engenharia *offshore*; dentre muitas outras, comumente encontradas no cotidiano.

Em muitas circunstâncias, dois ou mais corpos encontram-se suficientemente próximos uns dos outros, de modo que o escoamento ao redor de um deles interfere no movimento do fluido em torno do outro. Nas últimas décadas, muitos artigos que tratam do escoamento ao redor de corpos com geometrias variadas, utilizando tanto metodologias computacionais quanto experimentais, têm sido sistematicamente publicados. Ao longo deste período, esses estudos evoluíram consideravelmente, graças à utilização de novos instrumentos de medição e computadores cada vez mais sofisticados.

No que concerne à modelagem matemática deste tipo de problema, o escoamento é governado pelas equações de Navier-Stokes, cuja solução requer o uso de métodos numéricos, devido à forte não linearidade que caracteriza os termos inerciais. Soluções analíticas são possíveis apenas em casos onde grandes simplificações possam ser introduzidas.

Nos últimos anos, a dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), que já vinha sendo amplamente empregada como ferramenta de investigação científica, tem se tornado instrumento de inestimável valor também nos meios industriais, auxiliando na solução de inúmeros problemas de natureza prática. Esta técnica também é amplamente empregada, quando se busca a otimização de experimentos, ou quando a complexidade ou o alto custo de um experimento dificulta a realização de ensaios em laboratório.

2. ESCOPO E OBJETIVOS

Um vasto material bibliográfico foi encontrado sobre escoamentos ao redor de corpos rombudos. Entretanto, a esmagadora maioria destes trabalhos diz respeito ao escoamento em torno de cilindros de base circular não confinados e posicionados longe de outros obstáculos sólidos. O número de trabalhos que tratam especificamente do escoamento em torno de corpos de base quadrada é nitidamente inferior, justificando os esforços de pesquisa direcionados a este assunto, sobretudo quando agrupamentos de cilindros quadrados são enfocados.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo investigar numericamente o comportamento do escoamento ao redor de dois cilindros quadrados dispostos em diferentes arranjos, como mostra a Figura 1. As simulações foram realizadas para números de Reynolds variando de 50 a 1000 e diferentes valores do ângulo θ , mantendo-se a distância entre os cilindros fixa em $2d$. Em termos geométricos, os dois casos extremos são representados pelo arranjo *tandem*, onde $\theta = 0^\circ$, e pelo arranjo *side-by-side*, onde $\theta = 90^\circ$.

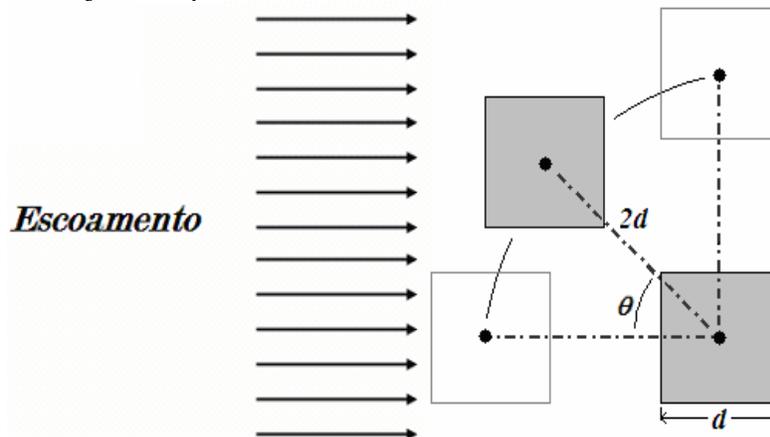


Figura 1. Nomenclatura adotada para o espaçamento e angulação entre os corpos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como ferramenta de trabalho, foi utilizado o programa de simulação *Fluids_1.0*, desenvolvido por Campregher (2002) no Laboratório de Mecânica dos Fluidos Computacional – LMFC de Ilha Solteira, que resolve as equações de Navier-Stokes 2D em coordenadas cartesianas, empregando o método dos volumes finitos. O programa permite o uso dos métodos SIMPLE e SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade, além de oferecer diferentes opções de tratamento para os termos advectivos, dentre as quais o esquema QUICK, utilizado nos presentes cálculos. As simulações foram realizadas para números de Reynolds inferiores a 1000 e sem a presença de bloqueio sólido. Os resultados numéricos foram comparados com dados da literatura e com resultados experimentais gerados no Laboratório de Visualização de escoamentos da UNESP Ilha Solteira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – A MALHA COMPUTACIONAL

Primeiramente, as simulações numéricas foram realizadas utilizando-se malhas uniformes, analisando-se a variação do número de Strouhal na medida em que o refinamento da malha é aumentado.

Nos testes de validação, as sondas foram posicionadas em locais estratégicos, seguindo recomendações de autores prévios, a fim de se obter uma boa captação dos dados a elas encarregados. O sinal da velocidade é tratado pela Transformada Rápida de Fourier (*FFT - Fast Fourier Transformate*). Proporcionando a análise da frequência fundamental de emissão dos vórtices dada através do número de Strouhal. Em todos os casos considerados no presente trabalho, foram descartados os resultados capturados pelas sondas numéricas anteriores à obtenção do regime estaticamente permanente na esteira dos cilindros.

Como condições de contorno, foram utilizadas velocidade imposta na entrada do domínio, condição de simetria nas laterais ($\partial u / \partial y = 0$) e condição de derivada primeira nula na saída do domínio ($\partial u / \partial x = 0$). A Figura 2 ilustra o posicionamento das sondas de velocidade 1 e 2, nas simulações realizadas para o encontro da malha adequada nas simulações.

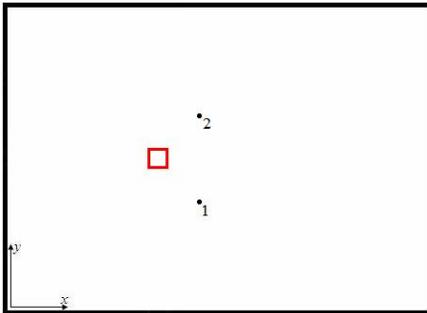


Figura 2. Posicionamento das sondas V.

As primeiras simulações realizadas foram para malhas uniformes com 5, 10, 15 e 20 divisões por comprimento característico designado por N/B . Os sinais das sondas de velocidade e os seus respectivos números de Strouhal foram obtidos e analisados para $Re = 100$. As frequências de aquisição de dados para os quatro casos foram iguais a 20Hz, e o tempo de simulação foi de 200 segundos, tempo este, mais que o suficiente para que a frequência das esteiras de vórtices entre em regime estatisticamente permanente.

Uma outra rápida análise sugere a utilização de malhas não uniformes, a fim de aumentar o refinamento apenas em regiões de interesse, minimizando o tempo de CPU e exigindo menos capacidade computacional.

Nas regiões mais afastadas dos corpos, utilizar-se-á compressão dos grids horizontais e verticais, e grids sem compressão na região de maior refinamento da malha (próxima aos corpos), designada também por N/B o número de grids por comprimento característico B .

Várias malhas foram testadas na região próxima aos cilindros, dentre elas se destacaram: $N/B = 5$, $N/B = 10$, $N/B = 15$, $N/B = 20$ e $N/B = 25$. Ao se afastar dos corpos, foi realizada nas malhas, a compressão dos grids.

Foram obtidos resultados para a frequência de emissão de vórtices da esteira com $Re = 100$ e tempo de simulação de 200 segundos. O posicionamento das sondas de velocidade para malhas não uniformes é exatamente o mesmo das malhas uniformes. Também foram analisadas seus sinais e suas respectivas FFTs.

A Tabela 1 sumariza os parâmetros geométricos para a construção da malha utilizada, sendo B o comprimento característico do cilindro, e N/B a relação entre o número de malhas e o comprimento característico do cilindro. A frequência de aquisição de dados nas sondas em todos os casos foi de 20Hz.

Tabela 1. Parâmetros para definição das malhas computacionais não uniformes.

Malhas não uniformes	N/B	X	Y	Número de Strouhal
5: 93 x 67	5	21B	15B	0,0912
10: 140 x 120	10	21B	15B	0,1425
15: 170 x 65	15	21B	15B	0,1601
20: 195 x 200	20	21B	15B	0,1614
25: 215 x 240	25	21B	15B	0,1613

A partir dos dados da Tabela 1, pôde-se considerar que a malha 195 x 200 é bastante adequada para as simulações, uma vez que utiliza um tempo de CPU não muito elevado, e os resultados do número de Strouhal são bastante satisfatórios.

Portanto, em todos os casos do presente trabalho, as malhas foram construídas da seguinte forma: na região de maior interesse (próximos aos cilindros), as malhas são uniformes e com 20 divisões por comprimento característico ($N/B = 20$), a partir desse ponto, as malhas serão comprimidas, à uma taxa de -3% por unidade de malha, até atingir o fim do domínio.

4.2. ANÁLISE DAS DIFERENTES ANGULAÇÕES ENTRE OS CORPOS

Em todos os casos estudados, além das sondas de velocidade, várias sondas capazes de registrarem a evolução temporal da pressão, também foram posicionadas em locais estratégicas (na linha de centro dos cilindros ao longo da direção x), como ilustrado na Figura 3. Verifica-se que, nas regiões mais afastadas dos corpos, é utilizado compressão dos grids, tanto horizontais como verticais, e grids sem compressão na região de maior refinamento da malha (próxima aos cilindros). A configuração das sondas varia de acordo com o arranjo dos cilindros, mas sempre seguindo o mesmo raciocínio.

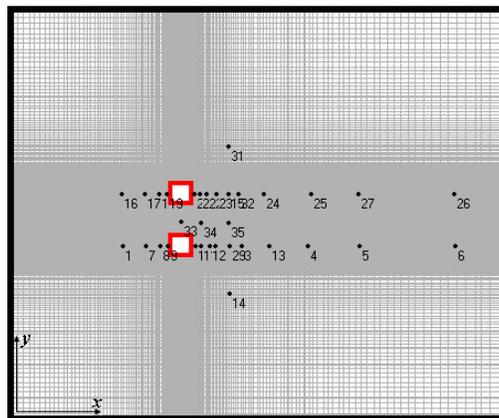


Figura 3. Posicionamento das diversas sondas de velocidade e pressão, malhas não uniformes.

4.2.1 ARRANJO $\theta = 0^\circ$

As sondas numéricas que registraram a evolução temporal da componente da velocidade na direção y , em um ponto pré-fixado da esteira está representado na Figura 4. Observa-se que, para todos os números de Reynolds analisados, a maioria das FFTs dos sinais de velocidade, apresentam uma frequência dominante de emissão de vórtices, como pode ser visto na Figura 5 que ilustra o sinal da velocidade e sua respectiva FFT, tratada para $Re=500$.

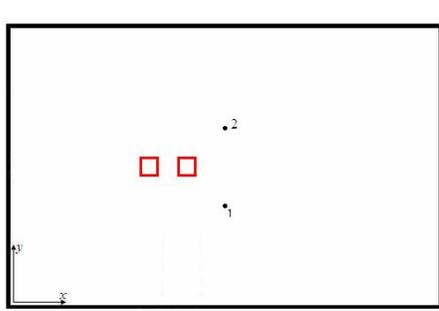


Figura 4. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 0$ (*tandem*).

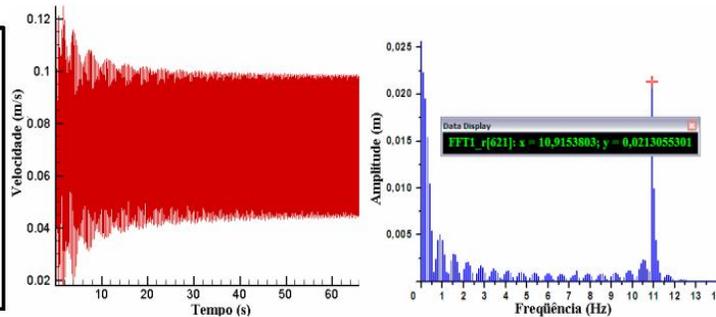


Figura 5. Sinal da velocidade v e a respectiva FFT, $Re = 500$, $\theta = 0$ (*tandem*).

Diante destes resultados, foi feita a análise dos resultados de todas as sondas envolvidas e o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds é mostrado no gráfico da Figura 6. Estes resultados foram comparados com os valores obtidos por Duarte (2001) e Lindquist (2000), ambos experimentais.

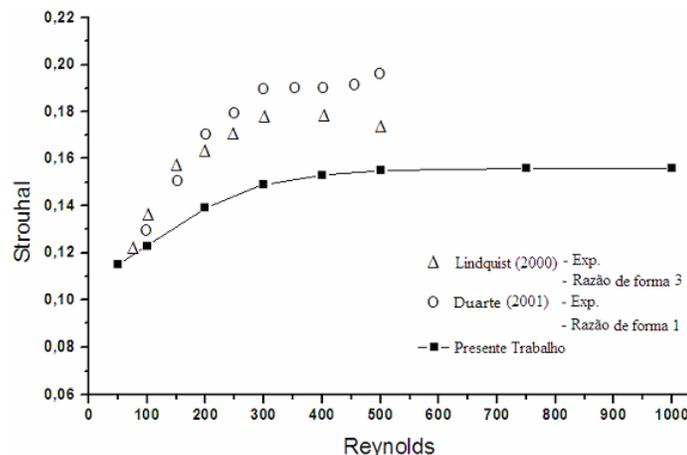


Fig. 6. Curva de Strouhal vs Reynolds, dois cilindros em formação *tandem*.

A curva mostra que o número de Strouhal apresentou um comportamento crescente à medida que se aumentou o número de Reynolds até $Re=200$. Em seguida, a curva adquiriu um ritmo de estabilização de Strouhal até $Re=500$, permanecendo assim, praticamente constante, com um posterior aumento de Reynolds. Comparando os resultados obtidos com os resultados de Duarte (2001) e Lindquist (2000), este último utilizando apenas um cilindro de razão de forma 3, observa-se uma boa concordância na tendência das curvas até próximo de $Re=500$. Porém, ocorreu uma discordância entre resultados no que diz respeito à estabilização de St , 19% em relação à Duarte (2001) e 13% comparando com Lindquist (2000), onde o primeiro mostra uma nova tendência de crescimento a partir de $Re=500$, e no segundo, em oposto ao anterior, de queda do número de Strouhal.

A representação gráfica dos mapas de isovorticidade, apesar de terem sido feitas para todos os casos de Reynolds estudados, neste trabalho, será apresentado apenas os estudos de $Re=500$, por questões de espaço, como ilustrado na Figura 7.

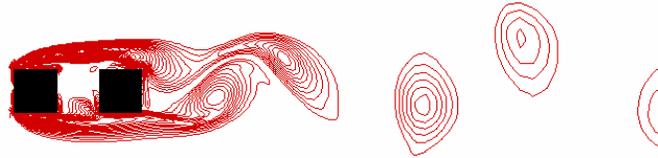


Figura 7. Mapas de isovorticidade, $\theta = 0$, $Re = 500$, $t = 110s$.

As imagens dos mapas de isovorticidade no escoamento *tandem* mostram que a configuração da esteira é bastante estável em modo de anti-fase. Pode-se observar também, que o desprendimento dos vórtices ocorre a uma distância cada vez menor à jusante dos corpos, com o aumento do número de Reynolds, acarretando assim, um aumento na frequência de emissão de vórtices, fato esse, verificado através da *Fast Fourier Transformate* – FFT.

4.2.2. ARRANJO $\theta = 90^\circ$

Para o arranjo *side-by-side*, seguindo o raciocínio *tandem*, foram posicionadas 4 sondas numéricas em pontos pré-fixados na esteira dos cilindros,

O comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds é mostrado no gráfico da Figura 8. Estes resultados serão comparados com os valores obtidos por Fogal (2002) e Lindquist (2000), ambos experimentais.

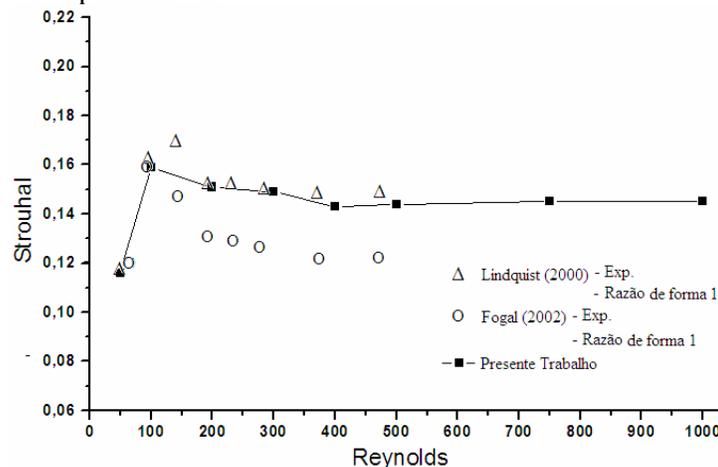


Figura 8. Curva de Strouhal vs Reynolds, dois cilindros em formação *side-by-side*.

Estes resultados mostram no presente trabalho, que o número de Strouhal apresenta um comportamento crescente até $Re = 150$, seguido de uma queda até atingir $Re = 400$, estabilizando-se posteriormente com o aumentar do número de Reynolds. Houve uma discordância entre resultados na estabilização do número de Strouhal, 16% em relação à Fogal (2002) e 4% comparando com Lindquist (2000), este último utilizando apenas um cilindro de razão de forma 1. Entretanto, os resultados obtidos pelo presente trabalho apresentam a mesma tendência das curvas dos autores comparados, todas com um pico do número de Strouhal por volta de $Re = 100$, seguido de uma estabilidade ao se aumentar o número de Reynolds.

Portanto, apesar de haver muita interação ente as esteiras dos cilindros, a emissão de vórtices comporta-se como se ambos os corpos estivessem isolados.

A Figura 9 mostra o mapa de isovorticidade para número de Reynolds igual a 500. As imagens dos mapas não são do mesmo instante de tempo e foram tomadas, em um instante onde o regime estatisticamente permanente de emissão de vórtices tivesse sido atingido.

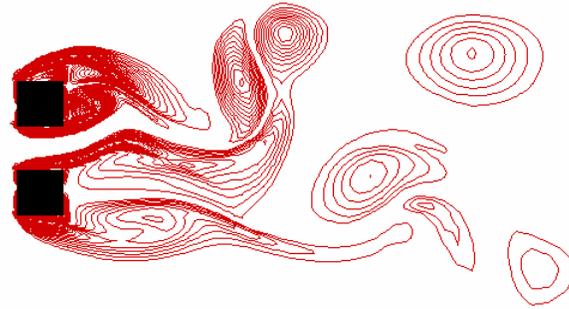


Figura 9. Mapas de isovorticidade, $\theta = 90^\circ$, $Re = 500$, $t = 115s$.

As imagens dos mapas de isovorticidade do escoamento com $\theta = 90^\circ$, correspondente ao arranjo *side-by-side*, mostram que a configuração da esteira não é totalmente estável, haja vista que os vórtices não estão bem definidos, havendo muita interferência entre os mesmos em uma distância curta na esteira à jusante dos cilindros, porém, em distâncias posteriores à essa região conturbada, a esteira dos cilindros torna-se estável mantendo a identidade dos vórtices por uma distância razoavelmente longa a jusante dos corpos. Pode-se observar também, que o desprendimento dos vórtices ocorre de forma semelhante ao caso *tandem*.

Há de se notar, que nesta configuração, verifica-se o acontecimento da maioria dos tipos de formação dos vórtices como: desprendimento em modo fase, bipolo, emparelhamento e *tearing*. Devido às fortes interações entre os vórtices, acontece também, em alguns instantes e de menor intensidade, o desprendimento dos vórtices em modo anti-fase.

4.2.3 ARRANJO $\theta = 22,5^\circ$

Para os arranjos intermediários, não faz sentido determinar a frequência de emissão de vórtices dos cilindros, visto que a geometria do problema não é simétrica. Assim, as FFTs das sondas, apesar de terem sido analisadas, foram posteriormente descartadas, pois, como era de se esperar, foram obtidos diferentes valores de frequências captados pelas sondas nos distintos pontos do domínio, impossibilitando assim, a obtenção de um único número de Strouhal.

O posicionamento das sondas para este arranjo é ilustrado na Figura 10. A Figura 11 mostra o mapa de isovorticidade para um número de Reynolds igual a 500 tomado em um instante onde o regime estatisticamente permanente de emissão de vórtices tivesse sido atingido.

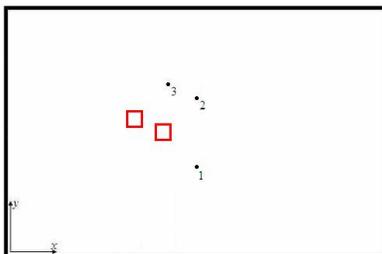


Figura 10. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 22,5^\circ$

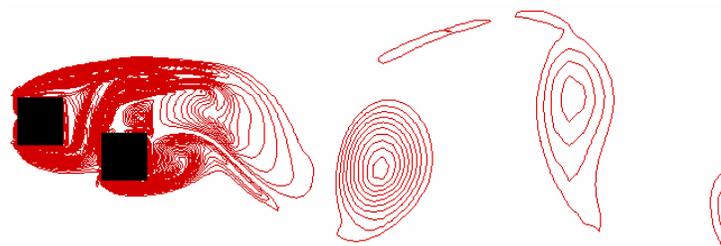


Figura 11. Mapas de isovorticidade, $\theta = 22,5^\circ$, $Re = 500$, $t = 91s$

Apesar de analisadas, os valores das sondas desta configuração, bem como suas respectivas FFTs serão omitidas, pois, como justificado anteriormente, o valor do número de Strouhal fica prejudicado neste posicionamento entre os corpos.

As imagens dos mapas de isovorticidade do escoamento com $\theta = 22,5^\circ$, mostram que a esteira não é dotada de simetria em vista da configuração dos cilindros no domínio. Neste caso a frequência de emissão de vórtices da esteira não pode ser analisada e avaliada como um todo, pois os vórtices se desprendem de maneira desordenada. A frequência de emissão dos vórtices em uma posição abaixo dos cilindros é diferente da mesma acima dos corpos, que por sua vez, também é diferente da frequência analisada em alguma posição intermediária. Impossibilitado de se obter uma única frequência de oscilação dominante da esteira, o número de Strouhal fica comprometido, portanto, analisa-se a formação e o desprendimento de vórtices à jusante dos cilindros.

Com relação à configuração da esteira e emissão de vórtices, aparecem nesta angulação algumas situações, como o bipolo, que ocorre para a maioria dos números de Reynolds analisados. A esteira não é totalmente estável, haja vista que os vórtices não estão bem definidos havendo muita interferência entre os mesmos em uma distância curta na esteira à jusante dos cilindros.

Os vórtices emitidos pela parte superior dos cilindros, são maiores em dimensão e em repetibilidade, ou seja, possui uma frequência de oscilação maior que os vórtices da parte inferior dos corpos. Além disso, no decorrer da simulação, nota-se que há um rompimento brusco dos vórtices superiores do segundo cilindro, devido a uma queda de pressão periódica que acontece à jusante do corpo superior, tal fato acontece periodicamente e fica acentuado com o aumento do número de Reynolds. Pode-se observar para essa configuração, que o desprendimento dos vórtices inferiores do primeiro corpo, assim como os superiores do segundo cilindro são desviados para a parte superior do primeiro corpo, isso também ocorre devido a uma queda de pressão que ocorre à jusante do cilindro superior.

O espaço para a formação e posterior desprendimento dos vórtices, ocorre de forma semelhante aos casos analisados anteriormente, ou seja, diminui com aumento do número de Reynolds.

A interferência dos vórtices do primeiro cilindro com a parte inferior do segundo corpo, em angulações até $\theta = 22,5^\circ$, acontece de maneira regressiva, com maior intensidade em menores ângulos. Essa interação é pouco dependente do número de Reynolds, pois em todos os casos analisados a interferência se deu de maneira contínua e ininterrupta até essa angulação.

4.2.4. ARRANJO $\theta = 45^\circ$

Seguindo o mesmo raciocínio do caso $\theta = 22,5^\circ$, foram posicionadas 3 sondas numéricas para este arranjo, como está ilustrado na Figura 12. A Figura 13 mostra o mapa de isovorticidade para um número de Reynolds igual a 500 tomado em um instante onde o regime estatisticamente permanente de emissão de vórtices tivesse sido atingido.

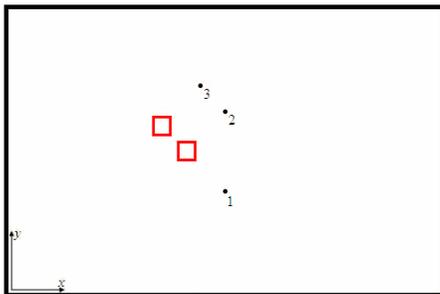


Figura 12. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 45^\circ$

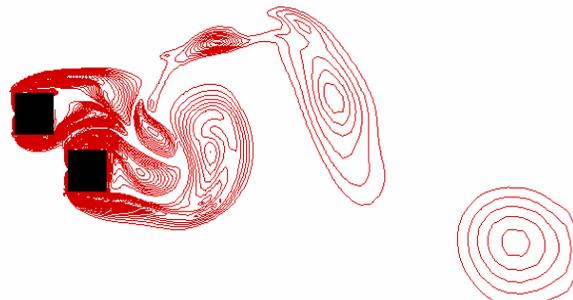


Figura 13. Mapas de isovorticidade, $\theta = 45^\circ$
 $Re = 500$, $t = 108s$

As imagens dos mapas de isovorticidade do escoamento com $\theta = 45^\circ$, mostram as mesmas características da situação no domínio onde $\theta = 22,5^\circ$, as diferenças passíveis de serem visualizadas entre tais configurações, estão na largura da esteira a jusante dos cilindros, maior do que no caso onde $\theta = 22,5^\circ$, e na não interferência dos vórtices inferiores do primeiro cilindro na parte inferior do segundo corpo.

4.2.5. ARRANJO $\theta = 67,5^\circ$

Para este arranjo, as sondas podem ser visualizadas na Figura 14. A Figura 15 mostra o mapa de isovorticidade para um número de Reynolds igual a 500 tomado em um instante onde o regime estatisticamente permanente de emissão de vórtices tivesse sido atingido.

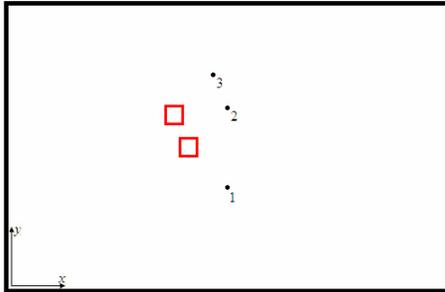


Figura 14. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 67,5^\circ$



Figura 15. Mapas de isovorticidade, $\theta = 67,5^\circ$
Re = 500, $t = 106s$

As imagens dos mapas de isovorticidade do escoamento com $\theta = 67,5^\circ$, demonstram as mesmas características das situações anteriormente apresentadas, onde a angulação entre os corpos se encontra em uma faixa intermediária dos casos extremos. No entanto, neste caso, duas diferenciações importantes devem ser avaliadas: numa delas, a partir desta angulação, as estruturas de vórtices chamadas bipolo, são comumente encontradas no decorrer do escoamento. A segunda diferenciação importante é o aumento significativo da largura da esteira à jusante dos cilindros, que aumenta consideravelmente quando comparado com a angulação de 45° .

5. CONCLUSÃO

Observou-se, com este estudo, que as diferentes situações da disposição dos corpos dão origem a configurações de escoamentos com características bastante distintas entre si. Os resultados obtidos indicam que à medida que se aumenta o ângulo entre os cilindros, a esteira a jusante dos corpos torna-se mais larga e migra de um formato em fase para uma formação anti-fase. A configuração *tandem* é composta de uma estreita esteira, crescendo à medida que a angulação entre os corpos é aumentada, até uma máxima espessura encontrada no arranjo *side-by-side*.

Com a variação do parâmetro θ , pôde-se notar que várias situações de configuração da esteira estiveram presentes nas simulações. O arranjo *tandem* foi caracterizado principalmente pela fina espessura da esteira à jusante. O outro caso extremo, *side-by-side*, foi caracterizado pela presença de todas as configurações possíveis da esteira (bipolo, emparelhamento e *tearing*). Praticamente em todos os casos, houve a deflexão do escoamento de fenda, tanto na direção do cilindro inferior, quanto na direção do cilindro superior. Tal deflexão pôde ser mais bem visualizada com o uso de animações.

Com relação à estabilidade dos vórtices, nota-se que a medida que se aumenta a angulação entre os corpos, compromete-se a estabilidade. A proximidade dos corpos faz com que os vórtices fiquem dependentes entre si, aumentando a espessura da esteira e diminuindo a frequência de emissão e, conseqüentemente, o número de Strouhal.

Nos casos intermediários de angulação entre os corpos, os sinais da FFT não apresentam frequências dominantes de emissão de vórtices, mostrando que o escoamento poderia estar transicionando para a turbulência, dificultando sobremaneira o estudo, pois, para a realização deste trabalho, nenhum modelo de turbulência foi utilizado.

Nas simulações do presente trabalho, não foi detectado a presença de biestabilidade no escoamento, como é sugerida por alguns autores da literatura.

5. AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Mansur, pela paciência, compreensão, orientação, e esclarecimentos técnico-científicos e aos meus familiares em geral, por me proporcionarem minha dignidade como um todo.

6. REFERÊNCIAS

Campregher, R.J., Simulação Numérica de escoamentos Transicionais e Turbulentos ao Redor de Geometrias Cartesianas, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, Ilha Solteira, Brasil, 135p, 2002.

Duarte, M., Estudo experimental do escoamento ao redor de arranjos de cilindros retangulares, Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, Ilha Solteira, Brasil, 2001.

Fogal, M. L. F., Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros retangulares posicionados em linha, Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, Ilha Solteira, Brasil, 2002.

Lindquist, C., Estudo Experimental do Escoamento ao Redor de Cilindros de Base Quadrada e Retangular, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp, Ilha Solteira, Brasil, 188p, 2000.

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO AO REDOR DE DOIS CILINDROS ROMBUDOS DE BASE QUADRADA EM DIFERENTES DISPOSIÇÕES DE GEOMETRIA EM RELAÇÃO AO ESCOAMENTO

Vincius Souza Morais
vvinciuss@dem.feis.unesp.br

Mateus Calegari Paulique
mateuspaulique@gmail.com

William H. K. Pereira
whkpereira@gmail.com

Eduardo F. Mega
eduardomega@dem.feis.unesp.br

Sérgio Said Mansur
mansur@dem.feis.unesp.br

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP – Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

Abstract: *The flow around square cylinders have a great practical importance in engineering and other applied sciences. In many situations, two or more solid bodies are placed sufficiently close to each other such as the flow around one of them changes the fluid motion around the adjacent ones. The incompressible flow around one pair of identical square cylinders disposed in different geometrical arrangements is investigated in this paper. The center-to-center distance between cylinders was fixed in $2d$, where d denotes the side of the square section. The angle between flow direction and the imaginary line connecting the cylinder's centers was varied from 0 to 90° . Unsteady two-dimensional simulations have been performed using an incompressible SIMPLEC finite-volume code employing cartesian staggered grid. A third-order QUICK scheme has been used to treat the advective terms in the Navier-Stokes equations. A fully implicit time discretization has been adopted for all variables. Simulations have been carried out for Reynolds numbers between 50 and $1,000$ revealing several flow patterns and the Re - St dependence. Results have been compared with numerical and experimental data from other authors and a good agreement has been found.*

Keywords: *Mechanical of fluids, Numerical Simulation, External Flow, Pair of Square Cylinders*