

A Interferência no Escoamento de um Fluido (Simulado Numericamente) Imposto pela Presença de Um Par de Cilindros de Base Quadrada, Dispostos em Diferentes Situações de Geometrias cartesianas.

¹Vinicius Souza Morais (UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira)

¹Rua:3 nº:20 Bairro:J.A. cep:15385000 – Iha Solteira/SP, vinicius.souza.morais@gmail.com

Este trabalho tem por objetivo a simulação numérica do escoamento em torno de um par de cilindros de base quadrada, afastados de uma distância d e dispostos de maneira que a linha imaginária que une o centro dos dois corpos formasse diferentes ângulos com a direção do escoamento. Como ferramenta de trabalho, foi utilizado o programa de simulação Fluids_1.0, desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos Computacional – LMFC da UNESP 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.

Mecânica dos fluidos, simulação numérica, escoamentos em torno de corpos rombudos de base quadrada.

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 adversas um ou mais corpos encontram-se suficientemente próximos uns dos outros, de modo que o escoamento em tubos de extração de petróleo, por exemplo, seja altamente prejudicado. De fato, tubulações e elementos estruturais posicionados lado-a-lado (*side by side*), em linha (*tandem*) ou em quincôncio (*staggered*) encontram-se continuamente submetidos a forças de natureza dinâmica produzidas pela passagem da água do mar ao redor destas estruturas, gerando escoamentos altamente complicados. Os esforços e as frequências oriundas da dinâmica turbilhonar particularmente ativa que caracteriza este tipo de escoamento devem ser conhecidos dos projetistas e levados em consideração em cálculos estruturais.

De acordo com Jester e Kallinderis (2003), estudos envolvendo a interferência mútua entre cilindros adjacentes tiveram início com as experiências de aplicação aeronáutica. Nas décadas seguintes, contribuições importantes para a compreensão da dinâmica do escoamento ao redor de cilindros circulares em *tandem* foram dadas por: Thomas e Kraus (1964), Ishigai et al. (1972), Zdravkovich e Pridden (1977), Arie et al. (1983), Zhang e Melbourne (1992), Sumner et al. (1999) e Lin et al. (2002). Embora haja divergências entre as conclusões apresentadas por estes vários autores, todos eles concordam que as características do escoamento para este tipo de arranjo dependem tanto do espaçamento entre os cilindros como da magnitude do número de Reynolds. O escoamento ao redor de cilindros em arranjo *side-by-side*, por sua vez, foi investigado por Ishigai et al. (1972), Williamson (1985), dentre vários outros autores.

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 linearidades 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.

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, pois o escoamento se torna ainda mais complexo, e quando ocorrido este tipo de estrutura dentro de tubulações de petróleo ocasiona grandes perdas de carga, maiores que para corpos cilíndricos.

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 $\theta = 90^\circ$.

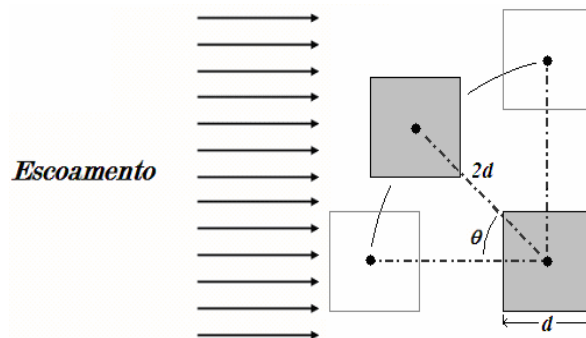


Fig. 1. Nomenclatura adotada para o espaçamento e angulação entre os corpos

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como ferramenta de trabalho, foi utilizado o programa de simulação Fluids_1.0, desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos Computacional – LMFC da UNESP 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 SIMPLEX 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.

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*), que passa o sinal da velocidade obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência em função da amplitude de oscilação. Proporcionando a análise da frequência fundamental de emissão dos vórtices dada através do número de Strouhal. A Figura 2 ilustra o posicionamento das sondas de velocidade 1 e 2, nas simulações realizadas com malhas uniformes.

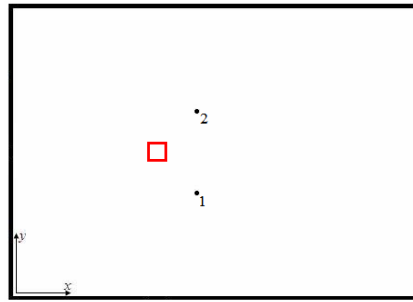


Fig. 2. Posicionamento das sondas V.

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 ($\partial u / \partial x = 0$).

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. 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. A Figura 3 ilustra o sinal de velocidade captado pela sonda 2 e sua respectiva FFT.

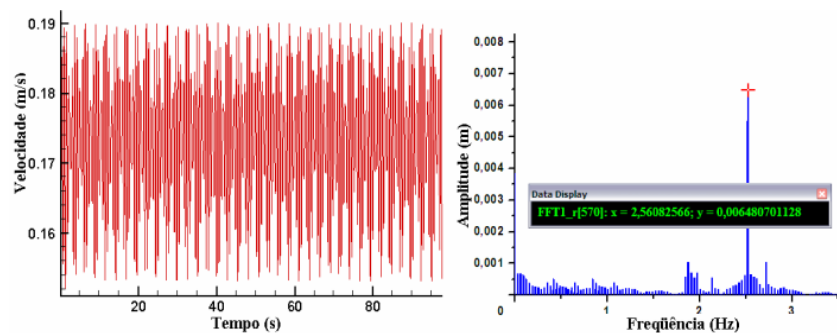


Fig. 3. Sinal de velocidade e a respectiva FFT, cilindro isolado, $Re = 100$, malha $N/B = 15$, sonda 2.

Analisando-se os sinais da evolução temporal da velocidade juntamente com sua FFT respectiva, nota-se que para as malhas uniformes analisadas nem sempre se tem apenas uma frequência de emissão de vórtices dominante, porém, em todos os casos, há sempre uma frequência de maior amplitude.

Num outro momento, uma 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).

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.

As Tabela 1 e 2 sumarizam os parâmetros geométricos para a construção das malhas utilizadas.

Tab. 1. Parâmetros para seleção das malhas uniformes.

Malhas uniformes	N/B	X	Y	Strouhal
5: 105 x 75	5	21B	15B	0,1027
10: 210 x 150	10	21B	15B	0,1345
15: 315 x 255	15	21B	15B	0,1630
20: 420 x 300	20	21B	15B	0,1612

Tab. 2. Parâmetros para definição das malhas computacionais não uniformes.

Malhas não uniformes	N/B	X	Y	Strouhal
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

Analisando-se os dados da Tabela 1, percebe-se que houve uma variação razoavelmente grande do número de Strouhal entre a malha $N/B = 5$ e a malha $N/B = 10$, cerca de 30%. Essa diferença diminui um pouco, quando a análise é realizada entre as malhas $N/B = 10$ e $N/B = 15$, cerca de 21%, porém, eleva-se o tempo de utilização da

CPU. O número de Strouhal obtido com a malha $N/B = 20$ pode ser um valor mais preciso, porém não muito diferente de $N/B = 15$, diferença menor que 1,2%, no entanto o tempo de CPU é extremamente alto, impossibilitando que malhas uniformes mais refinadas sejam testadas, com os recursos computacionais atualmente disponíveis.

A partir dos dados da Tabela 2, pôde-se considerar que a malha 195×200 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.

4.2. Análise das diferentes angulações entre os corpos

O domínio dos cálculos aqui realizados terá uma configuração parecida com a Figura 4. Observa-se que a distância entre os corpos se mantém fixa, assim como a razão das dimensões das fronteiras, variando apenas o parâmetro θ no domínio.

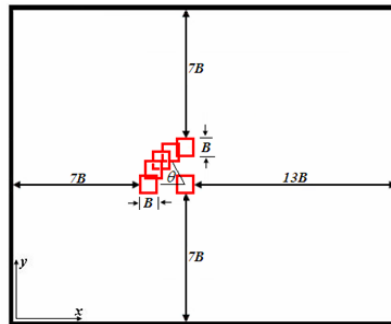


Fig. 4. Domínio de cálculo para realização das simulações ilustrando os diferentes ângulos θ entre os corpos.

O número de Strouhal é dado por $St = f D / v$, onde f representa a frequência de emissão dos vórtices, D é o comprimento característico dos corpos e v é a velocidade do escoamento.

4.1.1. Arranjo $\theta = 0^\circ$

Uma sonda numérica capaz de registrar a evolução temporal da componente da velocidade na direção y , em um ponto pré-fixado da esteira, fornece resultados bastante satisfatórios.

Para efeito de comparação, duas sondas foram posicionadas como mostra a Figura 5. Como a posição das sondas em relação aos corpos é simétrica, os resultados obtidos por elas foram idênticos na região de interesse, ou seja, na faixa onde a frequência de vórtices se torna estatisticamente permanente, como era de se esperar.



Fig. 5. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 0$ (tandem).

A Figura 6 que ilustra o sinal da velocidade e sua respectiva FFT, tratada para $Re=500$.

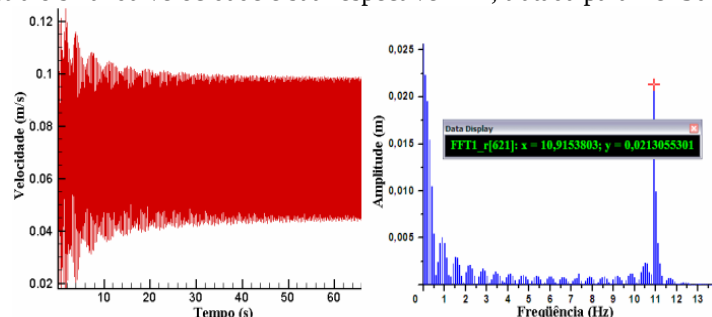


Fig. 6. Sinal da velocidade v e a respectiva FFT, $Re = 500$, $\theta = 0$ (tandem).

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 7. Estes resultados foram comparados com os valores obtidos por Duarte (2001) e Lindquist (2000), ambos experimentais.

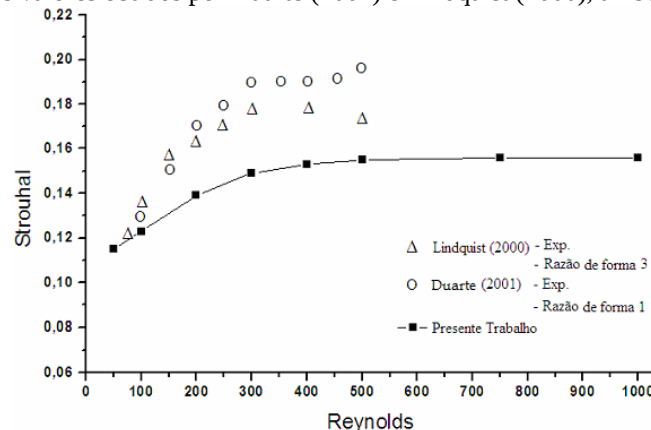


Fig. 7. Curva de Strouhal vs Reynolds para dois cilindros de base quadrada em formação *tandem*.

Estes resultados mostram 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.

Isto indica que o escoamento através de dois cilindros em formação *tandem*, se comporta aproximadamente como se fossem um único corpo com $\phi = 3$, o que pode ser explicado devido às bolhas de recirculação entre os corpos, não serem fatores de grandes interferências no segundo cilindro, o que foi observado também por Duarte. Estes resultados podem ser mais bem interpretados através da visualização do escoamento.

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 8.

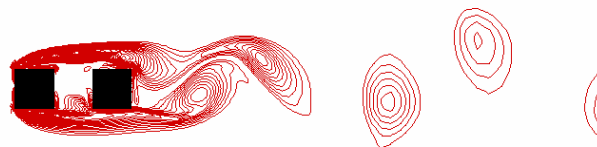


Fig. 8. Mapas de isovorticidade, $\theta = 0$, $Re = 500$, $t = 110s$.

As imagens dos mapas de isovorticidade no escoamento *tandem* mostram que a configuração da esteira é bastante estável, ou seja, os vórtices são bem definidos e mantêm suas identidades por uma distância razoavelmente longa a jusante dos cilindros. 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.

Há de se notar que, nesta configuração, o desprendimento dos vórtices da esteira está em modo de anti-fase e demais formações não são visualizados neste arranjo. Este modo de desprendimento de vórtices ocorreu, neste caso, para todos os números de Reynolds investigados, porém pode ser mais bem visualizado com o aumento da velocidade imposta na entrada do fluido, ajustada pelo número de Reynolds.

4.1.2. 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, capazes de registrarem a evolução temporal da componente de velocidade na

direção y . A partir da linha de centro do corpo inferior, 2 sondas (1 e 2) foram fixadas na posição $2B$ a jusante do mesmo, a sonda 1 em $-2B$ e a sonda 2 a $+2B$ na direção y . As sondas 3 e 4 para o corpo superior foram posicionadas analogamente àquelas do cilindro inferior. O posicionamento das sondas é ilustrado na Figura 9.

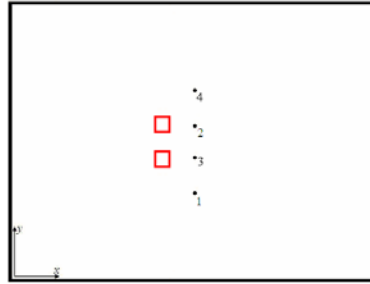


Fig. 9. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 90^\circ$ (side-by-side).

Como a posição das sondas em relação aos corpos é simétrica, os resultados das frequências obtidas por elas, foram idênticos na região de interesse, ou seja, onde a frequência de vórtices se torna estatisticamente permanente. Foi feita a análise dos resultados de todas as sondas, mas apenas uma sonda será demonstrada, pois há concordância entre as mesmas.

Os sinais de velocidade e frequência obtidos pela sonda 1 para números de Reynolds igual a 500 pode ser observado na Figura 10.

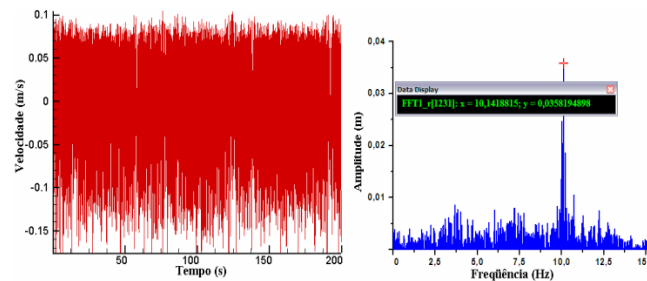


Fig. 10. Sinal da velocidade v e a respectiva FFT, $Re = 500$, $\theta = 90^\circ$ (side-by-side).

Observa-se que, a FFT dos sinais de velocidade não apresenta uma frequência dominante de emissão de vórtices para todos os números de Reynolds analisados. Este fato deve ocorrer, pois, em um dado instante, nos vórtices de baixa frequência, encontram-se estruturas turbilhonares sendo emitidas à uma alta frequência, que, quando captados pelas sondas, produz um gráfico onde existe vários nichos de frequências não dominantes.

O comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds é mostrado no gráfico da Figura 11. Estes resultados serão comparados com os valores obtidos por Fogal (2002) e Lindquist (2000), ambos experimentais.

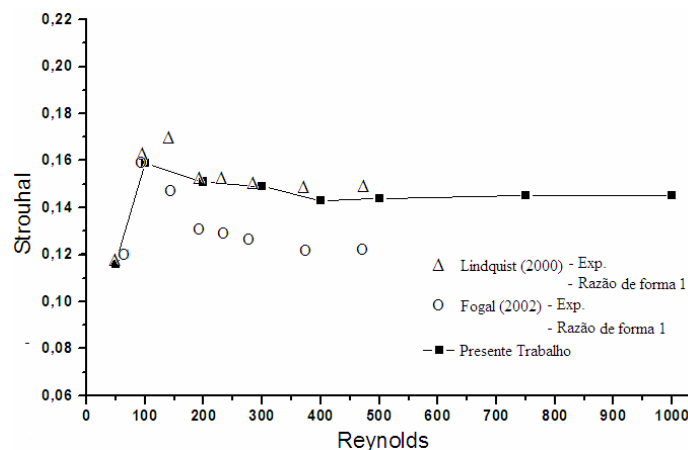


Fig. 11. Curva de Strouhal vs Reynolds para dois cilindros de base quadrada em formação side-by-side.

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 entre as esteiras dos cilindros, a emissão de vórtices comporta-se como se ambos os corpos estivessem isolados.

A Figura 12 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.

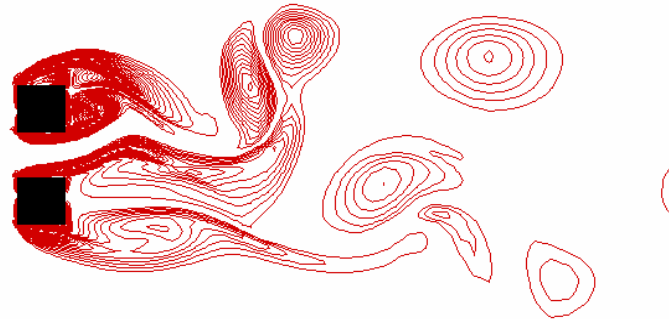


Fig. 12. Mapas de isovorticidade, $\theta = 90^\circ$, $Re = 500$, $t = 115s$.

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*, ou seja, com aumento do número de Reynolds, o tempo do desprendimento dos vórtices diminui, diminuindo também a distância à jusante dos corpos para a formação dos mesmos, acarretando assim, em uma maior frequência na emissão dessas estruturas, fato esse verificado na análise da frequência através da Fast Fourier Transformate – FFT.

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.

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.

4.1.3. Arranjo $\theta = 22,5^\circ$

O posicionamento das sondas é ilustrado na Figura 13.

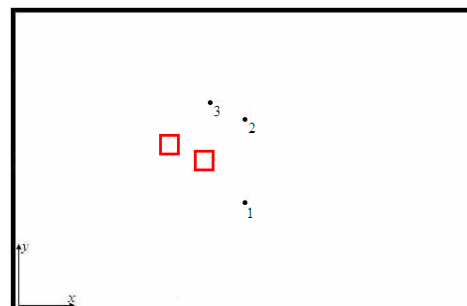


Fig. 13. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 22,5^\circ$.

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.

A Figura 14 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.



Fig. 14. Mapas de isovorticidade, $\theta = 22,5^\circ$, $Re = 500$, $t = 91s$.

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 à 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.

4.1.4. 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 15.

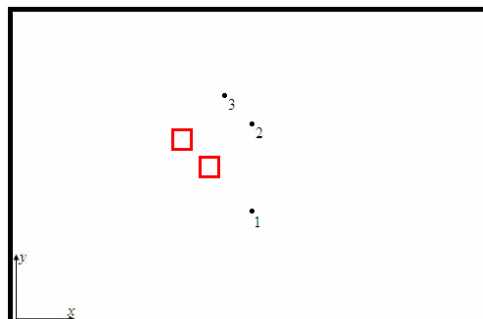


Fig. 15. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 45^\circ$.

As sondas dessa configuração, bem como suas respectivas FFTs também foram analisadas, e pelos mesmos motivos apresentados para $\theta = 22,5^\circ$ serão omitidas.

A Figura 16 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.

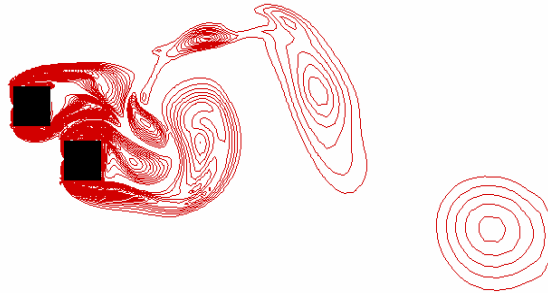


Fig. 16. Mapas de isovorticidade, $\theta = 45^\circ$, $Re = 500$, $t = 108s$.

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. Neste sentido, foi feito um estudo à parte, no intuito de tentar descobrir o que motiva essa interferência no escoamento. Tal estudo será apresentado logo adiante.

4.1.5. Arranjo $\theta = 67,5^\circ$

Para este arranjo, as sondas podem ser visualizadas na Figura 17.

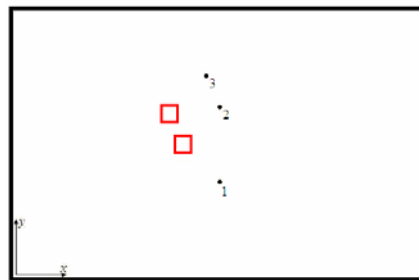


Fig. 17. Posicionamento das sondas de velocidade para $\theta = 67,5^\circ$.

As sondas dessa configuração, bem como suas respectivas FFTs também foram analisadas, mas não serão apresentadas pelos mesmos motivos apresentados nas seções anteriores.

A Figura 18 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.

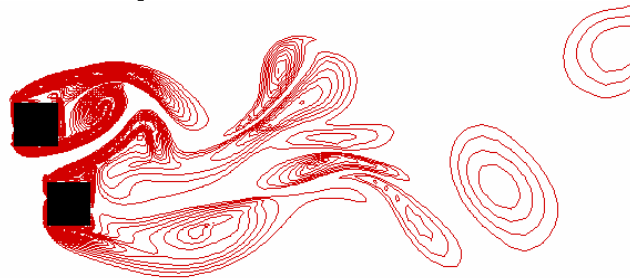


Fig. 18. Mapas de isovorticidade, $\theta = 67,5^\circ$, $Re = 500$, $t = 106s$.

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, compromete-se a estabilidade dos vórtices, a esteira a jusante dos corpos torna-se mais larga, migrando de fase para anti-fase, independentemente do número de Reynolds, podendo então ser visualizado alguns modos de emissão como: fase, anti-fase, bipolo, emparelhamento e *tearing*.

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, migrando de um formato simétrico (fase) em $\theta = 0^\circ$, para uma esteira anti-simétrica (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 relação à estabilidade dos vórtices, nota-se, pelas simulações, que ocorre a formação de estruturas turbilhonares bastante estáveis para a configuração *tandem*. A medida que se aumenta a angulação entre os corpos, compromete-se a estabilidade, até o caso extremo *side by side*, onde a estabilidade dos vórtices só é concretizada a distâncias relativamente grandes à jusante dos corpos. 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 e não foi detectado a presença de biestabilidade no escoamento, como é sugerida por alguns autores da literatura.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- Arie, M., Kiya, M., Moriya, M., Mori, H, Pressure fluctuations on the surface of two circular cylinders in tandem arrangement, *Journal of Fluids Engineering*, vol.105, pp.161-167, 1983.
- Campregher, R.J., *Simulação Numérica de Escoamentos Transicionais e Turbulentos ao Redor de Geometrias Cartesianas*, Dissertação de Mestrado, FEIS – Unesp, Ilha Solteira, Brasil, 135p, 2002.
- Duarte, M., *Estudo experimental do escoamento ao redor de arranjos de cilindros retangulares*, DEM – 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*, DEM – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, Ilha Solteira, Brasil, 2002.
- Ishigai, T., Nishikawa, Nishimura, K., Cho, K., Experimental study on structure of gas flow in tube banks with tube axes normal to flow, *Bulletin of JSME*, vol.15, pp.949-956, 1972.
- Ishigai, T., Nishikawa, Nishimura, K., Cho, K., Experimental study on structure of gas flow in tube banks with tube axes normal to flow, *Bulletin of JSME*, vol.15, pp.949-956, 1972.
- Jester, W., Kallinderis, Y. Numerical study of incompressible flow about fixed cylinder pairs, *Journal of Fluids and Structures*, vol.17, pp.561-567, 2003
- Lin, J.C., Yang, Y., Rockwell, D., Flow past two cylinders in tandem, *Journal of Fluids and Structures*, vol.16, pp.1059-1071, 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.
- Sumner, D., Price, S.J., Paidoussis, M.P., Tandem cylinders in impulsively started flow, *Journal of Fluids and Structures*, vol.13, pp.955-965, 1999.
- Thomas, D., Kraus, K., Interaction of vortex streets, *Journal of Applied Physics*, vol.35, pp.3458-3459, 1964.
- Williamson, C.H.K., Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.159, pp.1-18, 1985.
- Zhang, H., Melbourne, W.H., Interference between two circular cylinders in tandem in turbulent flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.41-44, pp.589-600, 1992.
- Zdravkovich, M.M., Pridden, D.L., Interference between two circular cylinders: series of unexpected discontinuities, *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol.2, pp.255-270, 1977.