

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO RUÍDO AERODINÂMICO GERADO PELO ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS

Carlos Henrique Loureiro Zink

carloszink@gmail.com

Resumo. Ao longo do texto são apresentados alguns resultados relativos a simulações da produção de som pelo escoamento ao redor de corpos valendo-se do método dos volumes finitos. Mostra-se, que com o auxílio de softwares de simulação numérica do escoamento e do emprego de modelos adicionais, como o de Lighthill, pode-se prever com precisão razoável o som gerado pelo escoamento ao redor de cilindros e no entorno de uma cavidade.

Palavras chave: Acústica, Aerodinâmica, CFD, LES

1. Introdução

Pesquisas de satisfação de clientes das indústrias de transporte têm indicado nas últimas décadas que uma das principais causas do desconforto dos passageiros e tripulações é o barulho no interior dos veículos. Em decorrência disso, o setor tem investido recursos importantes no estudo de formas de reduzi-lo.

As fontes principais de ruído nos veículos modernos são o ruído gerado pelo contato com o solo, o ruído do motor, o ruído provocado pelo vento e o ruído do sistema de climatização. Essas fontes de ruído podem ser separadas em duas classes principais, as fontes de origem mecânica e as fontes oriundas do escoamento.

Ao longo desse trabalho pretende-se aplicar alguns métodos numéricos de cálculo do escoamento e de previsão do ruído provocado por este.

A importância dos métodos numéricos se deve à redução de custos relacionada a uma campanha de ensaios menos extensa e às informações que eles provem. É possível obter simultaneamente dados como velocidade, pressão, massa específica e temperatura em todo o domínio simulado. Experimentalmente, o levantamento desses dados é realizado em um número restrito de pontos e normalmente interfere no escoamento.

Não se deve esquecer que tais métodos são fundamentados sobre modelos que não refletem a realidade em todos os aspectos. Além disso, erros de truncamento e capacidades ainda limitadas de memória e processamento são as principais dificuldades enfrentadas.

Por isso, a validação desses métodos contra modelos analíticos ou experimentais em geometrias simples é importante para permitir sua utilização no estudo de geometrias complexas para as quais uma análise mais simplificada não é evidente.

Durante esse período de trabalho, além do estudo teórico de alguns modelos de turbulência e parâmetros de malha, realizou-se algumas simulações nas quais pode-se verificar o comportamento dos diferentes modelos. O software comercial FLUENT® foi utilizado para tanto.

Simulações bidimensionais considerando o escoamento ao redor de um cilindro forneceram os primeiros resultados promissores para o cálculo do ruído gerado pelo escoamento. Em seguida, parte-se para um caso de cilindro 3D no qual são aplicadas as conclusões resultantes dos resultados 2D e, para finalizar, é simulado o escoamento nas vizinhanças de uma cavidade retangular.

2. Estratégia de resolução do problema

O fenômeno de geração de ruído pelo escoamento e a propagação das ondas sonoras pode ser bem representado pelas equações fundamentais da aerodinâmica, Navier-Stokes, continuidade, conservação de energia e segunda lei da termodinâmica.

A complexidade relacionada a resolução dessas equações leva a uma série de hipóteses e muitas vezes o campo acústico é resolvido desacoplado do escoamento. Contudo, muitos fenômenos são retro-alimentados, instabilidades do escoamento fazem com que ele seja dependente do campo acústico, como no caso do escoamento no entorno de uma cavidade.

Na tentativa de resolver o problema, dividi-se inicialmente o domínio de interesse em três regiões distintas, conforme representado na figura 1.

A primeira região é primordial para o estudo de aeroacústica por ser a zona onde ocorre a geração do som. Ela localiza-se próxima a interfaces sólidas, como cilindros e cavidades, ou em regiões onde os gradientes de velocidade e movimento turbulento são importantes, como no caso do jato livre. Nessa região a energia cinética turbulenta costuma a ser muito alta e o escoamento fortemente variável no tempo.

A segunda é uma região intermediária onde a turbulência é menos importante mas não negligenciável. Os gradientes de velocidade ainda são significativos porém a viscosidade não desempenha um papel importante para o escoamento. Nessa região o som é propagado e efeitos importantes como a refração das ondas acústicas podem ocorrer.

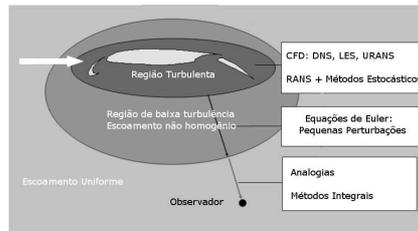


Figura 1: Decomposição do domínio e estratégias de solução

A terceira região é tida como uma região na qual as ondas sonoras são propagadas. Admitem-se então as hipóteses de homogeneidade do meio e de campo de velocidade uniforme. Geralmente, não há a necessidade de resolver as equações fundamentais da mecânica dos fluidos nesta região. Uma vez conhecido o escoamento na região da fonte, região I, o campo acústico é determinado diretamente a partir de analogias como a de Lighthill (1952) ou Ffwocs-Willians e Hawkings (1969).

3. Ruído provocado pelo escoamento ao redor de um cilindro

3.1 Condições de contorno

Busca-se nessa etapa determinar como as condições de contorno implementadas no software FLUENT® influenciam no cálculo direto do som. Em especial interessa-se pelo que acontece com as ondas sonoras que chegam a fronteira do escoamento.

Conforme pode ser visto na figura 2, que representa contornos de pressão ao redor de um cilindro submetido a escoamento cujo número de Mach ao longe vale 0,3, as ondas de pressão que chegam as fronteiras do domínio computacional são refletidas para seu interior.

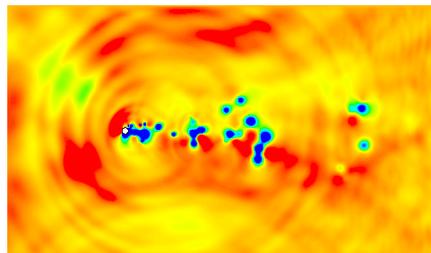


Figura 2: Contornos de pressão para cilindro simulado com condições de *Pressure far field* nas laterais

Sugere-se então a implementação de algum mecanismo de amortecimento das ondas sonoras na vizinhança das fronteiras. Para tanto, incluiu-se no interior do domínio interfaces de *porous jump* entre células próximas às laterais da malha. Tal interface representa uma perda de carga localizada, calculada através de uma parcela de perda inercial e outra relacionada a lei de Darcy.

Para o caso simulado sob essas condições não houve reflexão significativa das ondas de pressão que atingiam as laterais do domínio. O campo de pressão resultante é apresentado na figura 3.

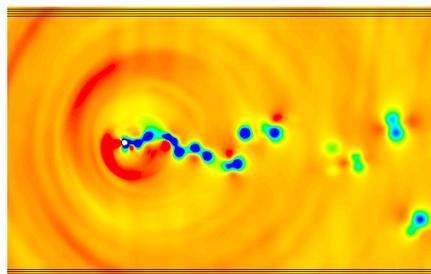


Figura 3: Contornos de pressão para cilindro simulado com condições de *Pressure far field* nas laterais e *porous jump* em três superfícies internas próximas às laterais

3.2 Malha

Adota-se o caso de referência para o qual dispõe-se de resultados experimentais, apresentados em Kooi (2006). É representado um cilindro com diâmetro de 19mm submerso em ar escoando com velocidade ao longe de 69,2m/s. As condições de contorno impostas são, *velocity inlet* na entrada, simetria nas laterais e *outflow* na saída.

Visando diminuir o custo computacional relacionado ao grande número de elementos na esteira em malhas estruturadas, num primeiro momento foi imposto que os elementos possuíssem uma grande razão de aspecto. Para o teste, construiu-se uma malha estruturada com 50.000 elementos quadriláteros e com razão de aspecto elevada na região da esteira. O caso teste do cilindro imerso em escoamento foi simulado com o modelo de turbulência $k - \omega$.

Concluiu-se que as simulações são sensíveis a razão entre a largura e a altura de cada elemento. O uso de elementos muito estirados, embora refinados, na região da esteira induz ao amortecimento mais acentuado dos vórtices e o cálculo incorreto dos coeficientes C_l e C_d .

Uma vez que as malhas estruturadas construídas apresentam um elevado número de elementos parte-se para a utilização de malhas não estruturadas. É então realizada uma simulação de um caso LES, com número de Reynolds e condições de contorno idênticas ao do caso anterior, com a malha de 30.000 células representada pela figura 4.

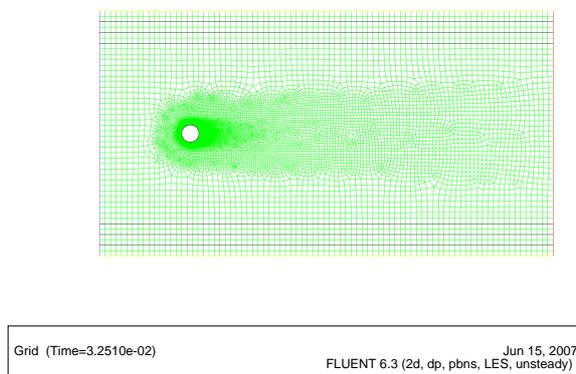


Figura 4: Malha bidimensional não estruturada constituída por quadriláteros

Embora com número de elementos pequeno a malha é refinada nas proximidades da parede para garantir que o escoamento seja resolvido até a subcamada viscosa da camada limite. O que pode ser comprovado sabendo-se que os valores de y^+ nas primeiras células ao redor do cilindro são inferiores a 4. Ressalta-se que o modelo LES adotado foi um modelo dinâmico que leva em consideração o transporte da energia cinética turbulenta, adequado a malhas nas quais os elementos são maiores e muito diferentes uns dos outros.

O contorno de vorticidade obtidos uma vez que o escoamento atingiu regime, figura 5, mostra-se coerente. Contudo, o número de Strouhal do coeficiente de sustentação, C_l , vale 0,23 para o cálculo realizado, ao invés de 0,19 conforme resultados experimentais apresentados por Norberg (2003).

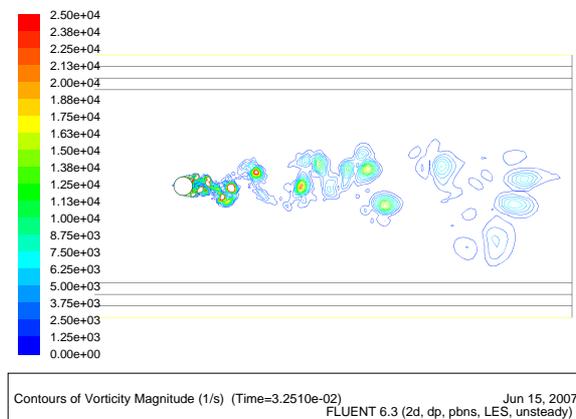
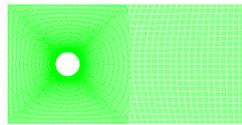


Figura 5: Contornos de vorticidade para escoamento ao redor de cilindro 2d

3.3 Modelos de turbulência

Paralelamente ao estudo de malha e das condições de contorno foram realizadas simulações preliminares nas quais testou-se diferentes modelos de turbulência. O som nesses casos era determinado lançando-se mão da analogia de Ffwoocs Willians e Hawckings.

A primeira malha utilizada, figura 6, possui somente 45.000 células mas é suficientemente refinada a ponto de ser apropriada para simulações LES.



Grid (Time=1.3799e-01) FLUENT 6.3 (2d, dp, pbrn, LES, unsteady) Jun 17, 2007

Figura 6: Malha para simulações LES do escoamento ao redor do cilindro

Uma vez levantada a evolução temporal do coeficiente Cl para simulações, $k-\omega$ SST, e LES verifica-se que para as simulações LES o sinal é muito perturbado enquanto que para simulações $k-\omega$ o desprendimento de vórtices ocorre harmoniosamente em uma única frequência.

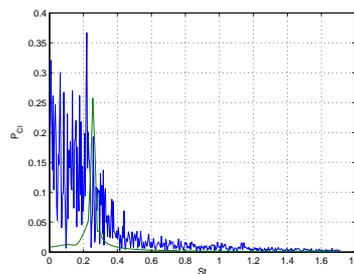


Figura 7: Espectro do coeficiente de sustentação para simulações $k-\omega$, em verde, e LES, em azul

Como pode ser visto na figura 7, a frequência dominante do Cl no caso da simulação LES corresponde a $St=0,21$, enquanto que para simulação $k-\omega$ SST o valor obtido é próximo a 0,25. Para o número de Reynolds do escoamento em questão, o valor de Cl deveria ser próximo a 0,19 de acordo com resultados apresentados por Norberg (2003).

Tomando-se alguns pontos afastados ao redor da parte superior do cilindro pode-se obter o nível de ruído em função do ângulo θ definido como o ângulo entre uma reta paralela ao escoamento ao longe e a reta que liga o observador ao centro do cilindro. Na figura 8 é apresentada a curva de OASPL em função de θ obtida para a simulação LES.

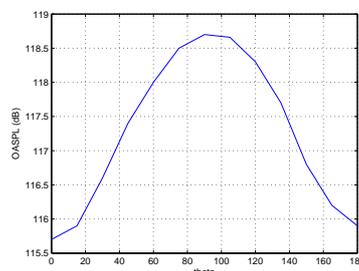


Figura 8: OASPL em função do ângulo theta formado entre o escoamento ao longe e o vetor que vai do centro do cilindro ao observador

O valor de OASPL calculado para um observador a 35 diâmetros de distância em um eixo perpendicular ao escoamento que passa pelo centro do cilindro foi de 111dB para a simulação $k-\omega$ SST e quase 119dB para a simulação LES. O valor experimental correspondente é de 117dB, Kooi (2006).

3.4 Cilindro 3d

Realizou-se uma simulação tridimensional do escoamento ao redor do cilindro empregando-se a estratégia de simulações de grandes escalas, LES. Para tanto, construiu-se uma malha computacional, figura 10, considerando que o primeiro elemento respeitaria a condição de $y^+ \leq 1$ e que os elementos na esteira seriam refinados o suficiente para representar com suficiente precisão os maiores turbilhões gerados.

A geometria em questão corresponde a porção fluida no entorno do cilindro de diâmetro igual a 19mm interior a um paralelepípedo de largura equivalente a 3,2 vezes o diâmetro, altura de 10 vezes o diâmetro e comprimento de 25 vezes o diâmetro. O cilindro localiza-se centrado a uma distância de 5 vezes o diâmetro da superfície de entrada do fluido no domínio conforme a figura 9.

A largura do domínio computacional foi determinada com base em uma expressão empírica apresentada por Norberg (2003) para o cálculo do comprimento de correlação do coeficiente de sustentação. Os demais comprimentos foram determinados em função de práticas usuais de simulação do escoamento ao redor de cilindros.

Com o auxílio do software comercial ICEM[®], foi gerada uma malha estruturada que possui por volta de 2,5 milhões de elementos e impõe um passo de tempo de $1 * 10^{-5}$ s, respeitando-se a condição de $CFL = 1$.

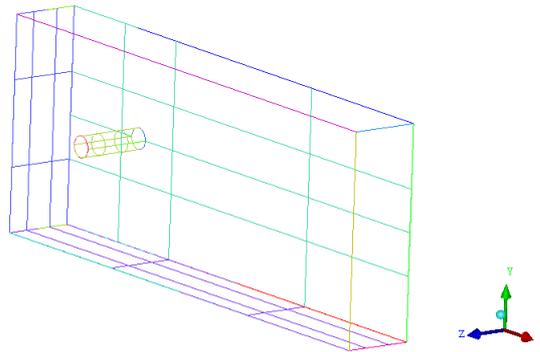


Figura 9: Geometria utilizada para gerar a malha tridimensional

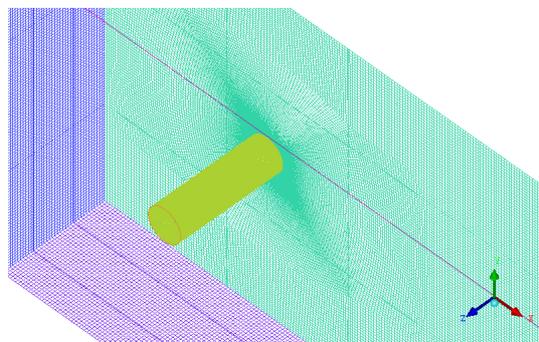


Figura 10: Malha superficial aplicada sobre a geometria 3d

Como condições de contorno foram empregadas *Velocity Inlet* no plano de entrada do domínio, *Outflow* na saída e *Simetria* nas laterais.

Os resultados preliminares obtidos são muito promissores, para o caso correspondente ao escoamento cujo número de Reynolds vale 90.000, o número de Strouhal do coeficiente de sustentação vale 0,1899 e apresenta um desvio de apenas 2% em relação ao valor calculado a partir de resultados experimentais disponíveis em Norberg (2003).

A curva de evolução temporal do coeficiente Cl mostrou-se muito menos perturbada do que aquela obtida para o caso 2d empregando LES, indicando que o sinal possui um menor número de componentes em frequência, fato que pode ser evidenciado através do uso da transformada de Fourier, figura 11

Os contornos de magnitude de vorticidade em planos perpendiculares ao eixo do cilindro, figura 12, e no plano radial em relação ao cilindro e paralelo ao escoamento, figura 13, indicam o caráter tridimensional do escoamento, como esperado.

Contudo, o tempo de simulação e a demanda de recursos computacionais tornou-se excessivo. Utilizando dois processos rodando em paralelo em um cluster SGI com processadores ITANIUM2, ao término de uma semana a simulação

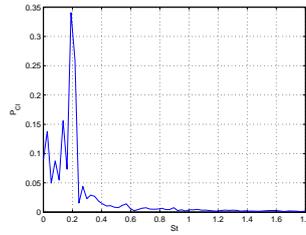


Figura 11: Espectro do coeficiente de sustentação para simulação LES do escoamento ao redor do cilindro 3d

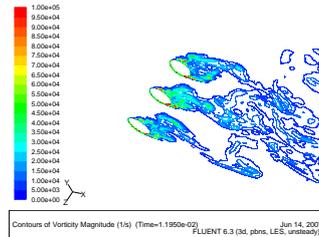


Figura 12: Contornos de vorticidade em planos perpendiculares ao eixo longitudinal do cilindro 3d, $Re=90.000$

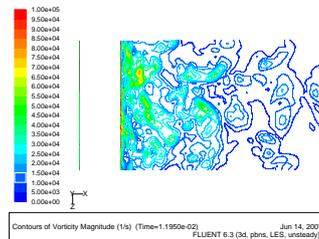


Figura 13: Contornos de vorticidade no plano radial ao cilindro e paralelo ao escoamento ao longe, $Re=90.000$

havia progredido apenas 1200 passos de tempo, o que equivale a 0,012s. Estima-se que o tempo de simulação necessário para obter-se os dados desejados seja próximo a um mês e meio.

4. Ruído provocado pelo escoamento nas vizinhanças de uma cavidade

Dando continuidade ao estudo do som gerado pelo escoamento ao redor de corpos, retomou-se o problema da geração de ruído pelo escoamento nas vizinhanças de uma cavidade.

Adotou-se o caso de uma cavidade com profundidade de 2,54mm cujo comprimento é o dobro da profundidade, $L/D = 2$, submetida a um escoamento cujo número de Mach ao longe vale 0,7.

Em sua tese de doutorado Gloerfelt (2001) demonstra que o escoamento em questão possui características fortemente bidimensionais, contudo, para garantir uma maior adequação do modelo LES, optou-se por uma simulação tridimensional. Foi criada a malha de elementos hexaédricos, estruturada cuja representação dos planos paralelos ao escoamento é apresentada na figura 14. A malha possui 61180 células no total e sua "envergadura" corresponde a 0,25 vezes a profundidade da cavidade.

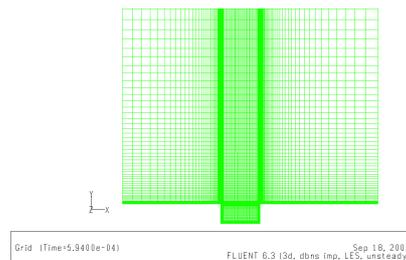


Figura 14: Malha utilizada na simulação do escoamento no entorno de uma cavidade

Novamente, buscou-se ao construir a malha que os primeiros elementos da camada limite estivessem na subcamada laminar com o valor de $y^+ < 1$. Essa condição é respeitada em quase toda a extensão da parede, exceto na região próxima ao início do domínio uma vez que foi imposto o perfil uniforme na superfície de entrada. Uma forma de contornar o problema seria a imposição do perfil analítico de Blasius como condição de entrada.

O modelo compressível disponível no software FLUENT® juntamente com a equação da energia e a estratégia de simulação das grandes escalas, LES, foram escolhidos para a resolução do problema. O passo de tempo adotado foi de $1 * 10^{-6}$ s.

Na figura 15 representa-se o campo de pressão calculado para o domínio no entorno da cavidade. Pode-se ver claramente as ondas emitidas em direção às fronteiras superior e montante.

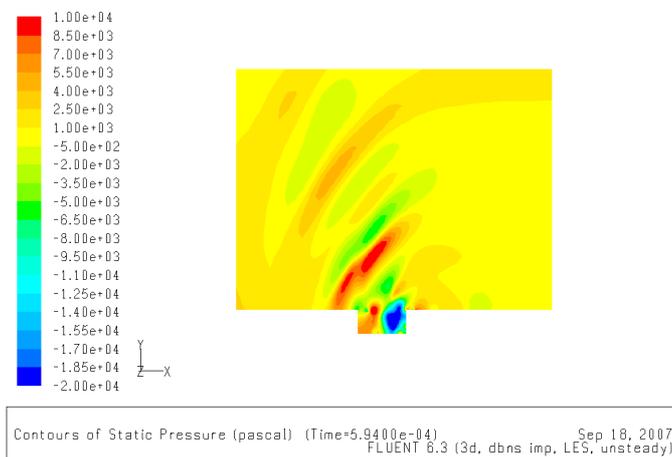


Figura 15: Contornos de pressão obtidos para a simulação do escoamento no entorno de uma cavidade

Comparando a figura 15 com a figura 16 verifica-se que a emissão de ondas sonoras obtida durante o presente trabalho possui as mesmas características do caso de referência. A figura 16 representa a visualização dos gradientes verticais de massa específica obtidos a partir da simulação direta do ruído provocado pelo escoamento no entorno de uma cavidade empregando métodos de diferenças finitas de alta ordem. Pode-se, contudo, comparar as flutuações de pressão obtidas com as flutuações de densidade, uma vez que adotou-se o modelo de gás perfeito e não há alteração significativa de temperatura.

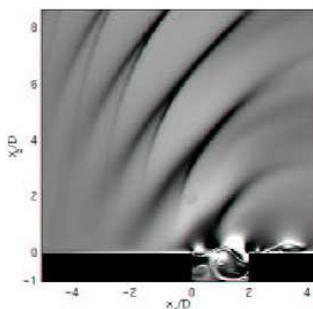


Figura 16: Visualização das ondas acústicas obtida através da simulação direta do escoamento por Gloerfelt [Gloerfelt, Bailly e Juvé 2003]

Nota-se que uma desvantagem do método dos volumes finitos de baixa ordem perante os métodos de alta ordem é a difusão numérica mais elevada que implica em um "espalhamento" da onda sonora. Esse efeito poderia ser amenizado se malhas mais refinadas e regulares fossem adotadas, logicamente requerendo um esforço computacional mais elevado. Neste caso não foi necessário modificar as condições de contorno disponíveis no software FLUENT® para evitar a reflexão de ondas acústicas para o interior do domínio uma vez que a própria difusão artificial se encarregou de eliminar tal efeito.

Nas figuras 17 e 18 é apresentada a evolução temporal dos campos de magnitude de vorticidade e de pressão no entorno da cavidade. Observa-se que a origem do ruído provocado pelo escoamento deve-se ao encontro de vórtices contra a aresta a jusante da cavidade. Esses vórtices, por sua vez, são resultado da interação entre as ondas de pressão aliadas a instabilidades do escoamento e a camada cisalhante existente entre os escoamentos exterior e interior à cavidade.

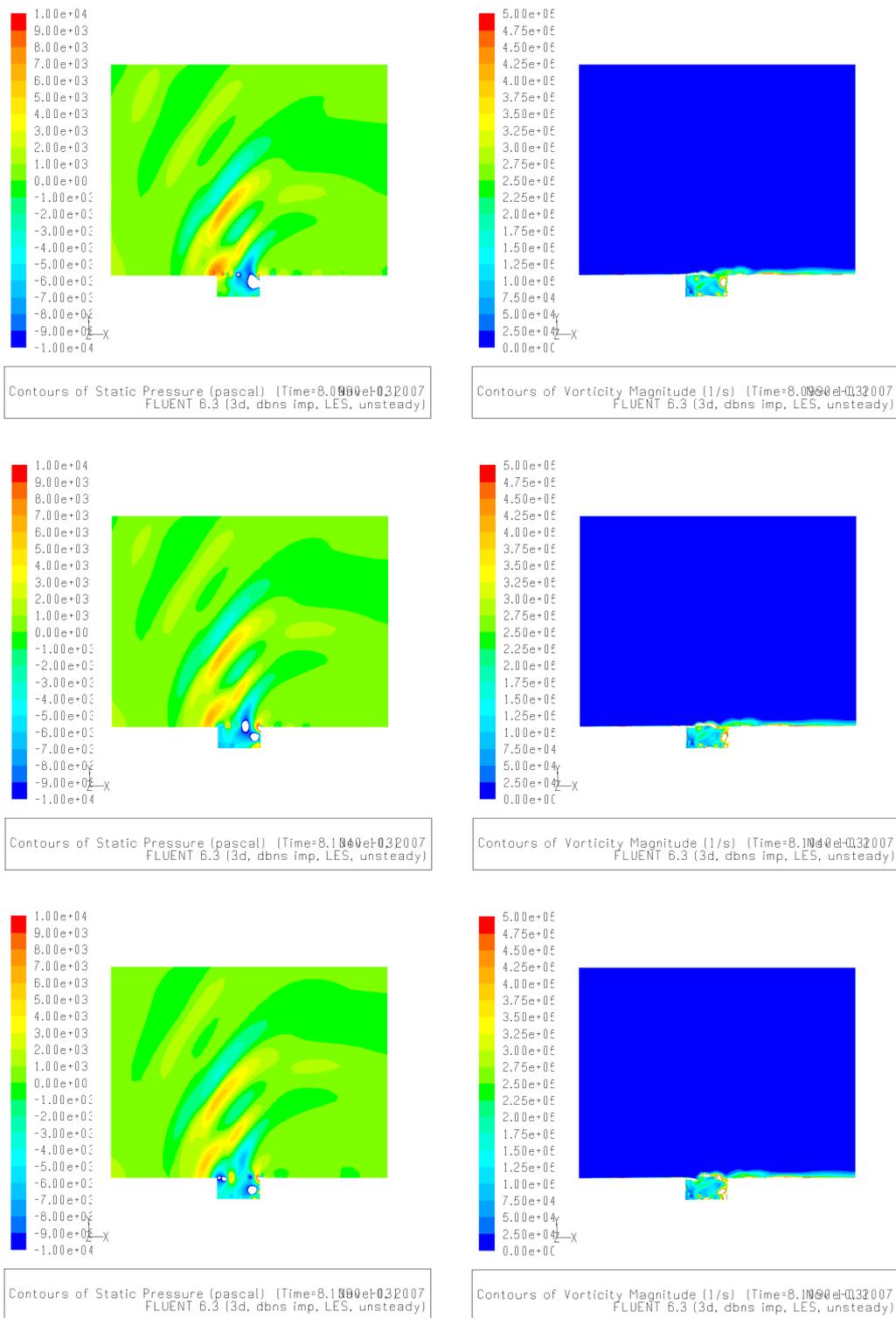


Figura 17: Evolução temporal dos campos de Pressão e Vorticidade

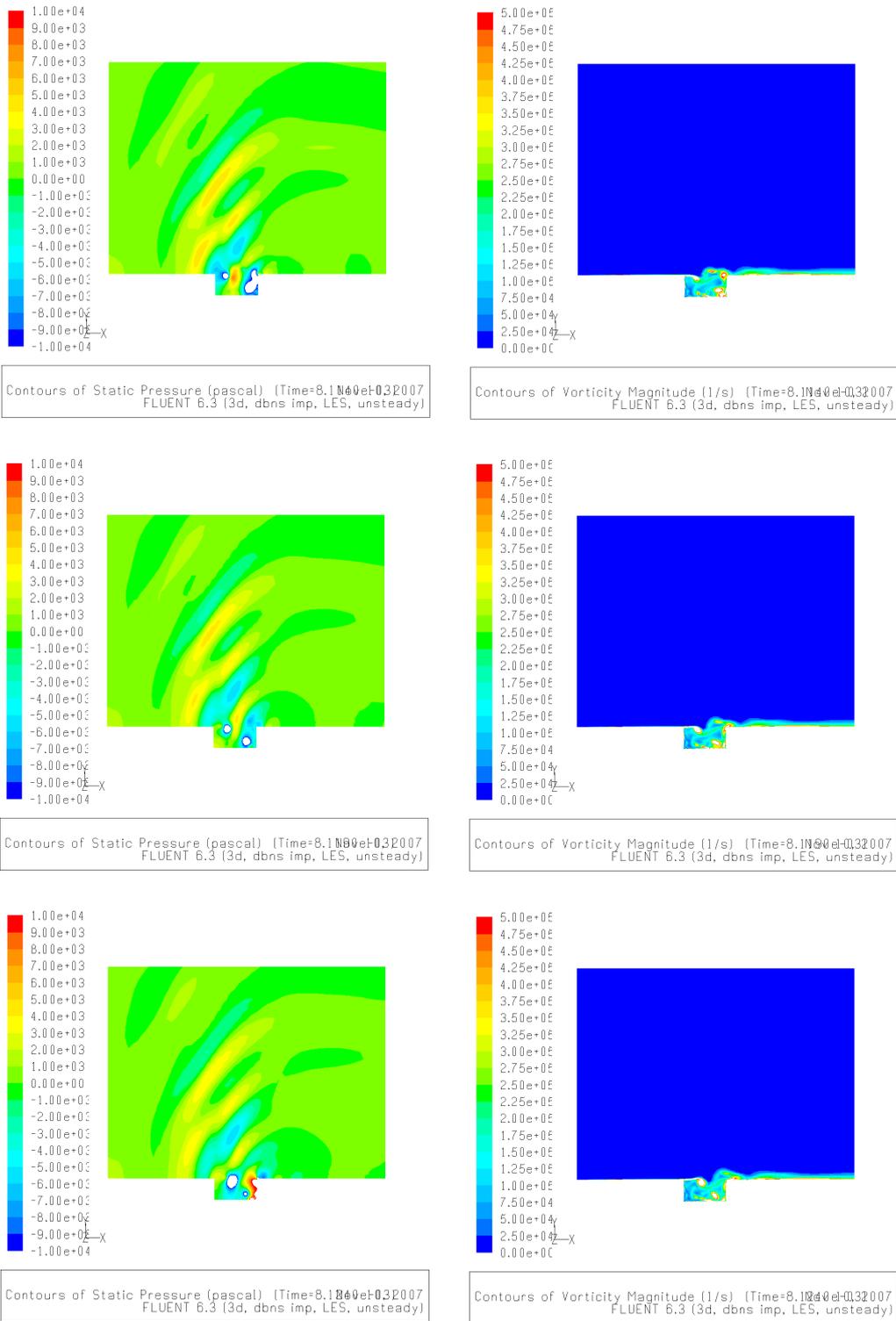


Figura 18: Evolução temporal dos campos de Pressão e Vorticidade

Durante a simulação armazenou-se o histórico de pressão em um ponto localizado sobre a aresta a montante a uma distância de 2 vezes a profundidade da cavidade. A transformada de Fourier do sinal, figura ??, é então calculada em função do número de Strouhal.

Define-se o número de Strouhal para o caso da cavidade baseando-se nos valores da profundidade da cavidade, D , da velocidade ao longe, U_0 , e das frequências, f , como $St = \frac{f \cdot D}{U_0}$.

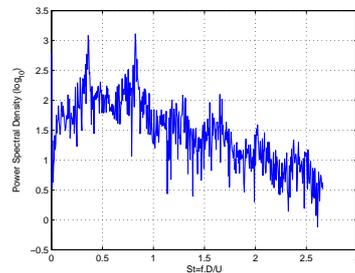


Figura 19: Histórico de pressão transformado

Na simulação realizada a componente predominante ocorre para valores de frequência correspondentes a $St = 0,81$. Há uma componente a $St=0,36$ e hârmônicos destas duas componentes.

Os resultados apresentam o mesmo comportamento dos obtidos por Gloerfelt (2001), contudo a componente principal obtida em seu trabalho corresponde a $St=0,66$. A diferença se deve provavelmente a baixa ordem dos esquemas de discretização empregados e a consequente má representação do mecanismo de acoplamento entre as instabilidades da camada cisalhante e as ondas sonoras geradas.

5. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

6. Referências

- GLOERFELT, X. *Bruit rayonné par un écoulement affleurant une cavité: Simulation aeroacoustique directe et application de méthodes intégrales*. Tese (Doutorado) — École Centrale de Lyon, Lyon, França, 2001.
- GLOERFELT, X.; BAILLY, C.; JUVÉ, D. Direct computation of the noise radiated by a subsonic cavity flow and application of integral methods. *Journal of sound and vibratio*, v. 266, n. 1, p. 110–146, 2003.
- KOOI, J. T. van der. *An experimental study of aeolian tones and trailing edge noise*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Twente, Enschede, Holanda, outubro 2006.
- NORBERG, C. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *Journal of Fluids and Structures*, v. 17, p. 57–96, 2003.
- PEROT, F. *Calcul du rayonnement acoustique d'écoulement turbulents basé sur des analogies acoustiques couplées aux simulations aérodynamiques instationnaires*. Tese (Doutorado) — École Centrale de Lyon, Lyon, França, 2004.

NUMERICAL SIMULATION OF THE NOISE GENERATED BY THE FLOW AROUND BODIES

Carlos Henrique Loureiro ZINK

carloszink@gmail.com

Abstract. *The aim of this work is to present some conclusions related to the numerical simulations of the flow around a cylinder and near a cavity using the finity volumes method and Lighthill's analogy. The sound pressure level for a observer far from the cilinder and the forces calculated are in good agreement with experimental data.*

Keywords. *Acoustics, Aerodynamics, CFD, LES*