



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008- A137

Análise acústica e dinâmica do escoamento em tubos ressonantes

Thiago Cardoso de Souza 1^(a),
Arcanjo Lenzi 2^(b),
Cesar J. Deschamps 3^(b).

(a) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900, Florianópolis, 88040-900, Santa Catarina, Brasil. E-mail: thiagosp@lva.ufsc.br

(b) Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 88040-900, Santa Catarina, Brasil.

Abstract

The present work is related with the turbulent flow dynamic and acoustic analysis in ducts with T-shaped Resonators. The intention is to check the edges effects over the flow variables and the acoustic sources in the edge region. The motivation of the study is coming from attenuation noise system in reciprocating compressors using T-shaped Acoustic Resonators. The GCI method, based only in the apparent order, was adopted to estimate the analytic solution for the variables associated, and to determine the discretization error due to the grid quality mesh. Results of velocity field, vorticity magnitude, and the sound sources were employed to do a detail flow analysis.

Resumo

O presente trabalho é centrado na análise acústica e dinâmica do escoamento em dutos com ramificações laterais, em condições de regime turbulento, com o propósito de verificar os efeitos de borda sobre as variáveis do escoamento e sobre a produção local de fontes sonoras vinculadas às flutuações de velocidades na região de ramificação. A motivação do estudo é oriunda de sistemas de atenuação de ruído via tubos ressonantes, com potencial aplicação em filtros acústicos de compressores alternativos. O método híbrido GCI foi empregado para uma estimativa da solução analítica para as variáveis analisadas, e para a estimativa de erro devido ao refino de malha. Resultados do campo de velocidade, da magnitude da vorticidade e das fontes sonoras associadas às flutuações de velocidades são empregados para uma análise detalhada do fenômeno.

1 Introdução

Filtros acústicos são dispositivos amplamente empregados em compressores alternativos, no entanto verifica-se a inadequação da utilização de mufflers (filtros acústicos reativos) em determinadas faixas de frequências. Tais faixas de frequência correspondem às frequências de ressonância dos componentes do filtro acústico.

Dentre as diversas propostas citadas com o intuito de otimizar a aplicabilidade de tais filtros, destaca-se a alternativa concernente à utilização de tubos ressonantes (Li e Viperman, 2004).

Com o intuito de avaliar os efeitos de tal proposta, surge a necessidade de sistematizar os parâmetros físicos associados ao escoamento com potencial implicação em tal otimização, dentre tais parâmetros, o presente artigo discute os efeitos de borda sobre as variáveis do escoamento.

A região de borda é oriunda do acoplamento do tubo ressonante com o tubo principal do filtro. Em tal região, devido à existência de um gradiente adverso de pressão, ocorre a subsequente separação da camada limite vinculada ao escoamento no tubo principal. Em tal caso forma-se uma camada cisalhante entre o escoamento principal e o fluido em repouso na região da cavidade (tubo ressonante).

A camada cisalhante é intrinsecamente instável e a consequência de tal atributo corresponde a um desprendimento de vórtices na região de borda, especificamente na borda anterior (Figura 1). Tais vórtices assemelham-se à esteira produzida após um corpo rombudo e se deslocam à jusante, chocando-se na borda posterior. A formação da camada cisalhante na região de abertura e o subsequente choque do desprendimento de vórtices resultam em fontes sonoras de espectro tonal (Howe, 1997).

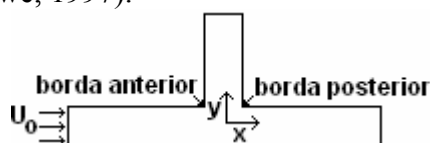


Figura 1: Vista lateral do desenho esquemático de um tubo ressonante acoplado ao tubo principal do Muffler.

No entanto, o espectro acústico geral relacionado ao escoamento sobre cavidades possui componentes de banda larga introduzidos por efeitos advindos da turbulência gerada pela camada cisalhante sobre a cavidade (Colonius, 2002).

Salientam-se os aspectos gerais de configurações geométricas do tipo T em diversas aplicações tecnológicas, sendo as mesmas comuns em diversos sistemas de transporte de gases e tal qual apresentando problemas associados às auto-oscilações da camada cisalhante. Tais oscilações caracterizam o processo de realimentação do campo acústico formado na cavidade (Rowley et al. 2002).

O presente trabalho considera a previsão do comportamento dos campos de velocidade associados ao escoamento na região de borda, tal que a caracterização local de fontes sonoras vinculadas às flutuações locais de velocidade na região de intersecção possa ser inferida. O intuito é verificar os parâmetros influentes na formação do problema acústico na região de acoplamento através de diferentes tipos de geometria de borda, de modo que a influência de parâmetros vinculados ao escoamento na aplicação de tubos ressonantes em filtros acústicos possa ser sistematizada.

2 Formação do Problema

Os experimentos numéricos foram efetuados para três malhas, sendo que apenas três tipos de bordas foram avaliadas:



Figura 2: Regiões de borda analisadas

Desta forma, têm-se três malhas com refinamentos distintos para cada tipo de borda analisada. O grau de refinamento neste experimento numérico ocorre de maneira crescente indo da malha C (mais grosseira) para a malha E (mais refinada).

Para a malha com borda tipo canto vivo, as três malhas associadas são denominadas unicamente pelas letras de C a E. Já as malhas com bordas curvas são denominadas C1, D1, e E1, e as malhas com borda híbrida C2, D2 e E2.

O impacto da variabilidade das variáveis analisadas devido ao refinamento da discretização foi inferido através do estimador GCI para o conjunto de pontos localizados na região de interseção e na região jusante a borda posterior.

2.1 Campo do Escoamento

O domínio estudado para a obtenção do perfil de velocidade, da magnitude da vorticidade e das fontes sonoras associadas ao escoamento é mostrado na figura 3:

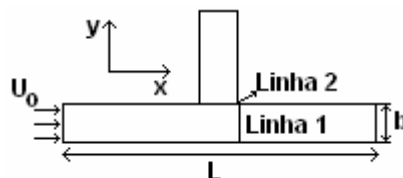


Figura 3: Domínio de cálculo para a determinação das variáveis numéricas analisadas.

O fluido em estudo possui como característica um peso específico unitário (1 kg/m^3), viscosidade dinâmica igual $\mu = 2 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$. As condições de contorno impostas são do tipo Dirichlet, sendo prescritos como condições de contorno, um conjunto de valores para a velocidade na entrada e um conjunto de valores de pressão na saída do tubo.

Para a entrada foi imposta uma condição de velocidade constante (95 m/s) com intensidade turbulenta da ordem de 3%. Na saída do tubo, a condição de contorno imposta é do tipo pressão, sendo neste caso a pressão de saída igual a atmosférica.

A geometria considerada possui uma distância b igual a 0.01 m, e comprimento $L = 0.7 \text{ m}$. A totalidade do conjunto de dados, afim de caracterizar os efeitos de borda, foi obtida na linha 1 e na linha 2. Sendo assim, o perfil de velocidade foi obtido para o conjunto de pontos localizados na linha jusante a região de interseção (Linha 1), e a magnitude da vorticidade, bem como os termos aeroacústicos foram inferidos através da linha 2 localizada na região de interseção.

2.2 Analogia de Lilley

A analogia de Lilley vincula-se à contribuição local de fontes sonoras geradas pela turbulência e pelo cisalhamento do escoamento médio.

Tal analogia é fundamentada na equação de Lilley sendo esta uma equação de 3ª ordem obtida através da combinação da equação da continuidade e do momentum (Goldstein, 1984):

$$\frac{D}{Dt} \left[\frac{D^2 \Pi}{Dt^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a^2 \frac{\partial \Pi}{\partial x_j} \right) \right] + 2 \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(a^2 \frac{\partial \Pi}{\partial x_j} \right) = -2 \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (1)$$

onde $\Pi = \left(\frac{1}{\gamma} \right) \ln \frac{p}{p_0}$, γ (constante) é a razão de calor específico.

O lado esquerdo da equação (1) apresenta termos não lineares de difícil abordagem. Com o intuito de evitar dificuldades inerentes a tais não linearidades, adota-se uma abordagem linear através da seguinte linearização (Colonius, 1997):

$$u_i(\vec{x}, t) = U_i(\vec{x}) + u'(\vec{x}, t) \quad (2)$$

onde, $u'(\vec{x}, t)$ é a componente vinculada à componente de velocidade turbulenta.

Introduzindo a linearização acima no termo fonte da equação (1) obtêm-se os termos derivados por Lilley:

$$S_1 = -2 \frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$S_2 = -6 \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - 6 \frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

O termo S1 envolve unicamente as componentes de velocidade turbulenta e, neste caso, é definido na literatura por Self-noise, já o termo S2 envolve o cisalhamento do escoamento médio e sua avaliação é feita usando o campo médio de velocidade. Neste caso tal termo é denominado Shear-noise.

As componentes de velocidade turbulenta (flutuações) são sintetizadas usando o método SNGR (stochastic noise generation and radiation). Neste caso, o campo de velocidade turbulenta e as derivadas necessárias para o cômputo dos termos fontes oriundos da analogia de Lilley (Eq.3) são inferidos através da síntese do campo de velocidade em cada ponto no espaço e no tempo através de modos de Fourier discretizados:

$$u(x, t) = 2 \sum_{n=1}^N \tilde{u}_n \cos(\vec{k}_n \cdot \vec{x} + \psi_n) \vec{\sigma}_n \quad (4)$$

onde \tilde{u}_n , ψ_n , $\vec{\sigma}_n$ são a amplitude, a fase, e o vetor unitário direcional, respectivamente, do n -ésimo modo de Fourier associado ao vetor número de onda \vec{k}_n .

Este algoritmo, quando combinado com um modelo estatístico (modelo k- ϵ padrão ou SST), permite a descrição estatística dos termos fontes (fontes acústicas).

A equação (3) possui uma forma atraente devido à extensão do conceito de Lighthill sobre a distribuição quadrupolar de fontes, pois neste caso a definição do termo fonte abrange o escoamento médio (Goldstein, 1984). Sendo assim, o termo S2 pode ser interpretado como

análogo a uma distribuição externa de tensões, $u'_i u'_j$, impostas sobre o escoamento médio (Colonius, 1997).

2.3 Índice de Convergência do Grid

O método GCI objetiva estimar a incerteza numérica. Sua avaliação têm sido feita em inúmeros trabalhos vinculados à área da fluidodinâmica computacional (Celik, 2003). A obtenção da avaliação da incerteza da solução numérica é feita através da seguinte relação (Celik, 2003):

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (5)$$

onde GCI é o indicativo da incerteza da solução numérica obtida e e_a^{21} é o erro relativo aproximado dado pela seguinte relação:

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (6)$$

onde ϕ_1 é valor da variável numérica da malha mais fina, ϕ_2 é valor da variável numérica da malha mais grossa, e r_{21} a razão de refino da malha mais fina em relação a mais grossa, definida neste trabalho através do número de elementos da malha.

No presente trabalho foram utilizadas malhas estruturadas com razões de refino constante, sendo a distinção entre as mesmas vinculadas através da seguinte relação (Celik, 2003):

$$q = \frac{h_2}{h_1} \quad (7)$$

onde h_1 é o número de elementos da malha fina, h_2 é número de elementos da malha grossa, q é a razão de refino entre as malhas fina e grossa. No presente estudo a razão de refino é $q = 4$.

Para o cálculo dos valores extrapolados há a necessidade de determinar a ordem de convergência espacial oriunda dos resultados numéricos, sendo neste caso inferida uma ordem de convergência aparente p . Neste trabalho são utilizadas malhas com razões de refino constante de tal maneira que a ordem aparente é determinada para o presente caso através da seguinte relação:

$$p = \frac{\ln\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_3}\right)}{\ln(q)} \quad (8)$$

sendo o numerador da equação (8) definido como a razão de convergência. Desta forma os valores extrapolados são determinados através da seguinte expressão:

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{(r_{21}^p \phi_1 - \phi_2)}{(r_{21}^p - 1)} \quad (9)$$

onde ϕ_{ext}^{21} é o valor extrapolado da variável numérica analisada, considerando os resultados obtidos para a malha fina ϕ_1 e grossa ϕ_2 .

3 Metodologia de Solução

Com o intuito de se reduzir o esforço computacional associado a uma malha tridimensional de grande refinamento é utilizada, neste trabalho, uma malha bidimensional, não captando neste caso, as flutuações de velocidade na direção da largura do tubo ressonante.

A obtenção dos dados numéricos do presente trabalho foi feita através do software Fluent (6.0), sendo o solver de tal software fundamentado no método dos volumes finitos baseados em elementos. Afim de caracterizar apenas os termos fontes associados às flutuações locais de velocidade, a analogia de Lilley foi implementada.

Tendo-se estabelecido que o erro numérico deve-se unicamente aos erros de discretização, os resultados na região de intersecção foram inferidos, determinando desta forma os efeitos de borda sobre as variáveis a serem discutidas.

A totalidade dos erros numéricos vinculados às simulações efetuadas, devem-se exclusivamente aos erros de discretização, sendo portanto considerado que os possíveis erros de arredondamento, iteração, programação são desprezíveis quando comparados aos erros de discretização.

A minimização dos erros de arredondamento foi obtida realizando as simulações com variáveis de dupla precisão. Já os erros de iteração foram minimizados em consequência de um grande número de iterações, afim de que se tornasse apenas um erro de arredondamento.

O processo de iteração do software Fluent é limitado por um critério de convergência definido a partir dos resíduos normalizados oriundos da integração e consequente discretização das equações governantes. Sendo assim, o processo de iteração é interrompido quando os resíduos normalizados das referidas equações sejam da ordem do critério de resíduo adotado. Neste artigo foi especificado um erro de resíduo tomado como critério de convergência pelo software, da ordem de 10^{-7} .

O modelo numérico empregado em todas as simulações numéricas efetuadas usa como função de interpolação, um esquema acurado de segunda ordem (Second Upwind Scheme), aliado ao algoritmo de acoplamento pressão-velocidade SIMPLEC, sendo todas as simulações efetuadas implicitamente com transiente distorcido de modo a obter rapidamente a solução em regime permanente.

4 Resultados

4.1 Perfil de Velocidade

A razão de convergência foi inferida para o conjunto de três malhas, CDE, C1D1E1 e C2D2E2, sendo tal tríade feita para as malhas associadas aos três tipos de borda. A obtenção da ordem aparente foi obtida a partir da solução numérica do problema em três malhas diferentes, sendo estas denominadas fina, vinculada a letra E, grossa, letra D e super-grossa, letra C. Conforme citado, as malhas sem numeração, como o conjunto CDE refere-se às malhas com borda do tipo canto vivo. Já as malhas C1D1E1 às bordas do tipo curva, e as malhas C2D2E2 às bordas do tipo híbrido.

Valores negativos para a razão de convergência foram obtidos para o conjunto de dados próximos à região de parede, sendo portanto um indicativo de que em tais pontos existe convergência oscilatória (Celik, 2003). Sendo assim, não foi possível definir uma ordem aparente de convergência para pontos próximos à parede. A priori, a hipótese para a não definição da ordem espacial aparente em tais pontos foi considerada como sendo efeito do uso não adequado das funções parede usadas nas simulações.

Afim de verificar tal hipótese, foram efetuadas simulações com tratamento adequado da região de parede para malhas menos refinadas (mantendo-se a razão $q = 4$) em relação as apresentadas neste trabalho. Os resultados mostram uma mudança do perfil devido ao refino na parede.

Com o intuito de reduzir o custo computacional, as simulações numéricas com tratamento de parede foram feitas com um menor nível de refino, de modo que os erros de discretização foram maiores quando comparados à solução numérica do conjunto de malhas com discretização bem refinada e sem tratamento adequado da camada viscosa.

Contudo, embora os erros de discretização sejam maiores na adequação da resolução da camada viscosa, visto neste caso serem utilizadas malhas menos refinadas, a redução do custo computacional implica em uma maior difusão numérica, visto que as funções de interpolação utilizadas são do tipo Upwind.

No entanto, foi verificado que a totalidade do conjunto de dados da variável velocidade axial, não apresenta convergência oscilatória elevada quando comparada aos dados da mesma variável para o conjunto de malhas CDE resolvidos sem tratamento de parede adequado. De fato os resultados numéricos mostram a existência de um comportamento não assintótico evidenciado pela existência de convergência oscilatória em 44% dos dados próximos à região da parede localizados na linha 1 para a tríade de malhas CDE sem resolução da camada viscosa.

Afim de aplicar a extrapolação para tal conjunto de malhas, o tratamento de parede para as malhas CDE foi implementado. Tal tratamento permite estabelecer nós adjacentes à região da parede, tal que a localização de tais entidades encontrem-se na região logarítmica (FLUENT, 2005).

Sendo a malha C mais grosseira em comparação as malhas D e E, foi utilizado para tal o modelo padrão k- ϵ com tratamento padrão de parede. Tal tratamento permite estabelecer que nós adjacentes a região da parede encontram-se na região logarítmica de velocidade onde, mediante correlações empíricas (funções de parede), tal região é resolvida.

Devido ao aumento sucessivo de refino, os nós adjacentes à região de parede das malhas D e E estarão fora do limite da região de perfil logarítmico, de modo que a aplicação de funções de parede passa a ser não mais adequada, bem como a aplicação do modelo padrão k- ϵ , cujo mesmo não é preciso para a resolução da subcamada viscosa. Em vista de tais limitações o modelo SST foi adotado, sendo tal modelo de turbulência do tipo híbrido, cuja resolução da subcamada viscosa é feita utilizando-se o modelo k- ω e afastando-se de tal região o modelo padrão k- ϵ passa ser adotado.

A figura 4 mostra a variabilidade dos perfis de velocidade associados ao refino de malha. No presente caso os dados referem-se às bordas do tipo canto vivo (Malhas C, D e E). O resultado obtido do perfil através da extrapolação pode ser também verificado (figura 4)

E plenamente observável a consistência das simulações numéricas, visto que não existe variância significativa dos resultados a partir do conjunto de dados obtidos para a malha com maior nível de discretização (Malha E) em relação ao perfil de velocidade estimado através da extrapolação via GCI.

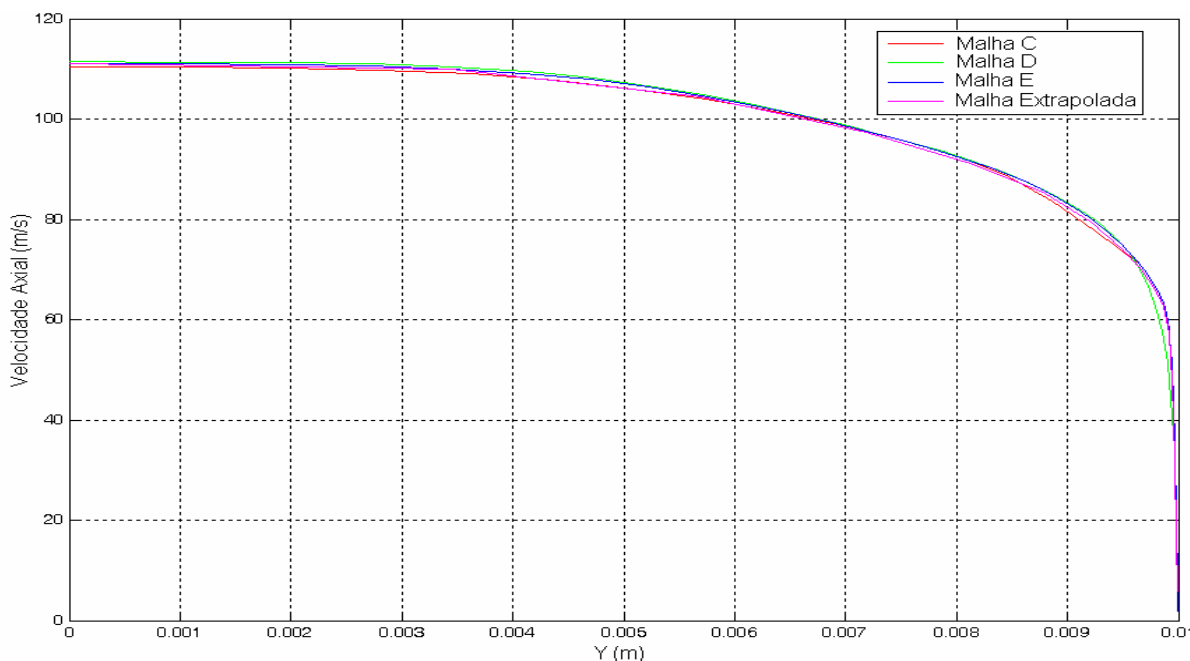


Figura 4: Perfis de velocidade na linha 1 obtidos para as Malhas C, D, E, e o perfil obtido via extrapolação.

Para as malhas com bordas curvas (Malhas C1, D1, e E1) sem tratamento de parede, os resultados numéricos referentes ao perfil de velocidade apresentaram convergência oscilatória em sua totalidade. De modo que a inferência de uma ordem aparente torna-se não plausível, inviabilizando a aplicação da extrapolação e a impossibilidade de se avaliar a incerteza numérica vinculada ao índice GCI.

Deste modo, e de forma semelhante ao caso anterior, os resultados numéricos para as malhas curvas foram aqueles referentes à simulação com tratamento de parede, cuja sistematização é similar ao caso anterior, ou seja, o modelo de turbulência aplicado a malha C1 é o modelo padrão $k-\epsilon$ e para as demais malhas, o modelo SST.

Através das referidas modificações para o conjunto de malhas de bordas do tipo curva, a extrapolação e a aferição da incerteza numérica via índice GCI foram determinadas. Os resultados numéricos não indicaram em tal caso convergência oscilatória para nenhum ponto extraído da linha 1. No entanto, tais resultados apresentaram uma incerteza numérica maior, dado o elevado valor do índice GCI para determinados pontos.

Tal qual para as malhas com bordas curvas (Malhas C1, D1, e E1) sem tratamento de parede, os resultados numéricos referentes ao perfil de velocidade apresentaram convergência oscilatória para grande parte dos resultados oriundos das simulações numéricas concernentes a malha com bordas híbridas (Malhas C2, D2, e E2) sem tratamento de parede. O conjunto de dados neste caso apresentam convergência oscilatória em torno de 78 %.

Logo, a obtenção de uma ordem aparente para uma quantidade pequena de pontos localizados na linha 1 não é suficiente para caracterizar os efeitos das bordas híbridas sobre o perfil de velocidade, sendo necessária uma maior quantidade de pontos. Sendo assim, as simulações com tratamento de parede foram utilizadas, e de forma similar para a malha C2, aplica-se o modelo padrão $k-\epsilon$, para as demais malhas D2 e E2, usa-se o modelo SST.

A figura 5, apresenta o perfil de velocidade axial na linha 1 obtido para as malhas com maior nível de refino, aliado à incerteza numérica associada à discretização na região jusante à intersecção para os três tipos de bordas analisadas, E, E1 e E2. O GCI inferido através da

Eq.5 foi obtido usando um valor médio para a ordem aparente, sendo esta uma medida global da ordem de acurácia das simulações numéricas efetuadas (Celik, 2003):

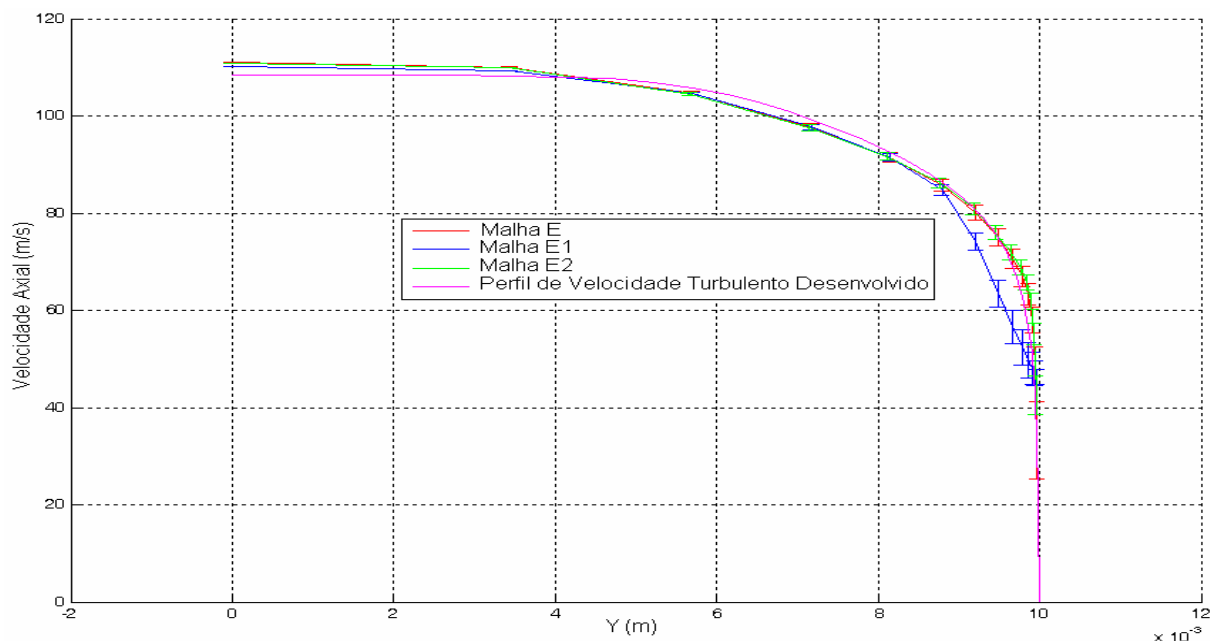


Figura 5: Solução numérica do perfil de velocidade obtido para as malhas de maior nível de refino E, E1 e E2, com a incerteza numérica associada.

Os resultados mostram que a região de borda provoca a desaceleração do elemento de fluido, sendo um resultado esperado uma vez que tal região consiste em uma região de separação, caracterizando a tendência de diminuição da velocidade axial do escoamento. Os resultados numéricos mostram que a região de intersecção com borda do tipo curva implica em uma redução maior da velocidade axial quando comparada às demais bordas analisadas.

4.2 Magnitude de Vorticidade

De maneira similar aos dados concernentes ao perfil de velocidade, os resultados numéricos vinculados a vorticidade na região de borda foram inferidos com base em critérios numéricos estabelecidos a priori.

O escoamento considerado no presente trabalho apresenta um extenso campo de vorticidade na região de borda, como mostram os resultados para a malha com borda canto vivo e borda híbrida. A existência de tal campo na região de intersecção promove uma significativa interação (não aprofundada no presente estudo) de oscilações auto sustentadas do campo acústico local com o escoamento na região de borda.

Os resultados, abaixo (figura 6), mostram para as malhas com maior nível de refino (Malhas E, E1 e E2), o contorno e o comportamento funcional da vorticidade na região de intersecção:

O comportamento funcional da vorticidade na região de intersecção foi inferido através dos resultados numéricos obtidos localmente através da linha 2. Desta forma, foi possível verificar a variabilidade da referida variável do trajeto da borda anterior à borda posterior da cavidade. Para as malhas com canto vivo (CDE), e para as malhas com bordas híbridas (C2D2E2), os resultados numéricos associados não apresentaram convergência oscilatória

para os pontos localizados na linha 2, diferentemente dos resultados vinculados à malha com borda curva (CID1E1), que em sua totalidade apresentaram convergência oscilatória. Diante de tais restrições não contornáveis, a extrapolação dos valores obtidos para a malha com borda curva, no que se refere aos valores da vorticidade na região de borda não foi possível de ser obtida. No entanto, pelos contornos da figura 6, e da análise das figuras, é notória a baixa vorticidade de tal malha quando comparada às malhas com outros tipos de bordas:

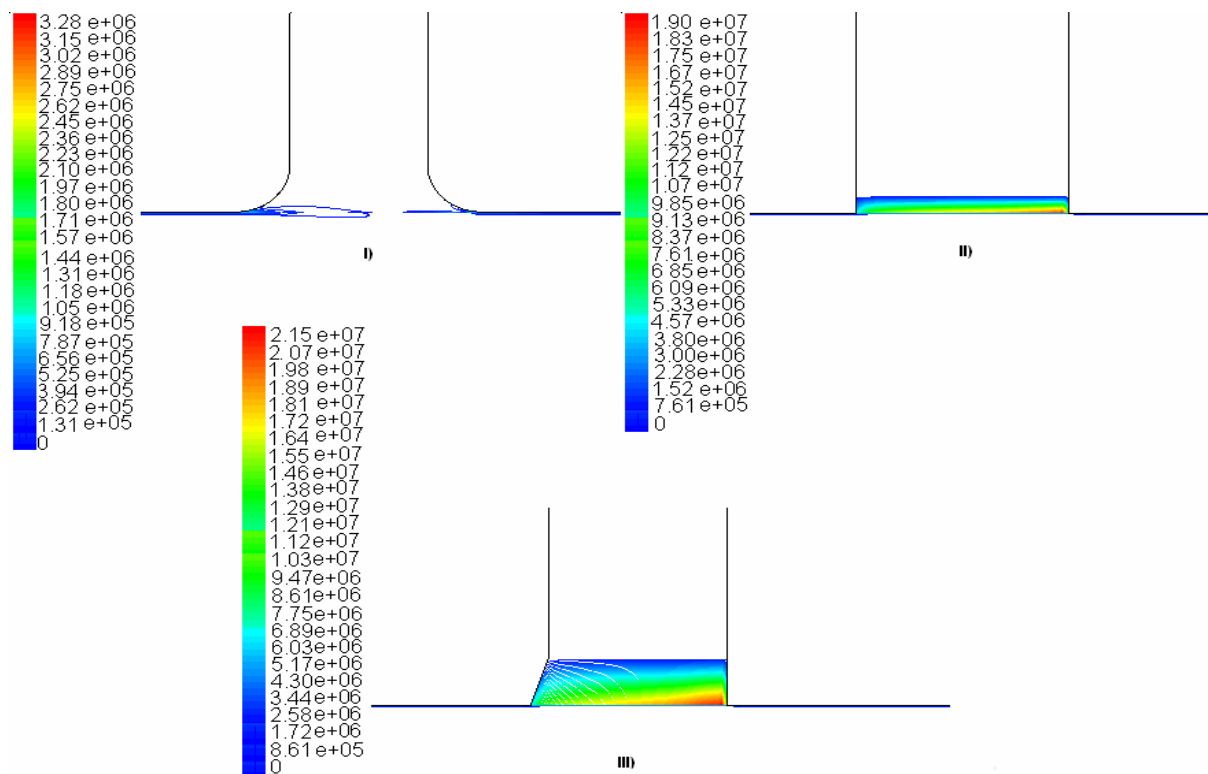


Figura 6: Campo de vorticidade obtido para as malhas I) Malha E1, II) Malha E, III) Malha E2.

Nota-se um sucessivo aumento da vorticidade no trajeto referente à borda anterior e à borda posterior da cavidade, um comportamento já evidenciado na literatura (Colonius, 2002). De fato, a colisão da camada cisalhante formada na região de intersecção com a borda posterior da cavidade origina as ditas oscilações auto sustentadas, sendo esta uma fonte sonora não aprofundada neste trabalho.

4.3 Termos Fontes

Os termos fontes (equação (3)) foram obtidos usando o citado algoritmo SNGR (equação (4)). Sendo assim, os termos de Lilley foram inferidos através de uma abordagem estocástica de modo a caracterizar qualitativamente a potencial produção de termos fontes locais.

A análise estimada do perfil analítico dos termos fontes de Lilley não foi possível de ser obtida devido à ocorrência de convergência oscilatória na linha 2 para a totalidade dos dados numéricos obtidos.

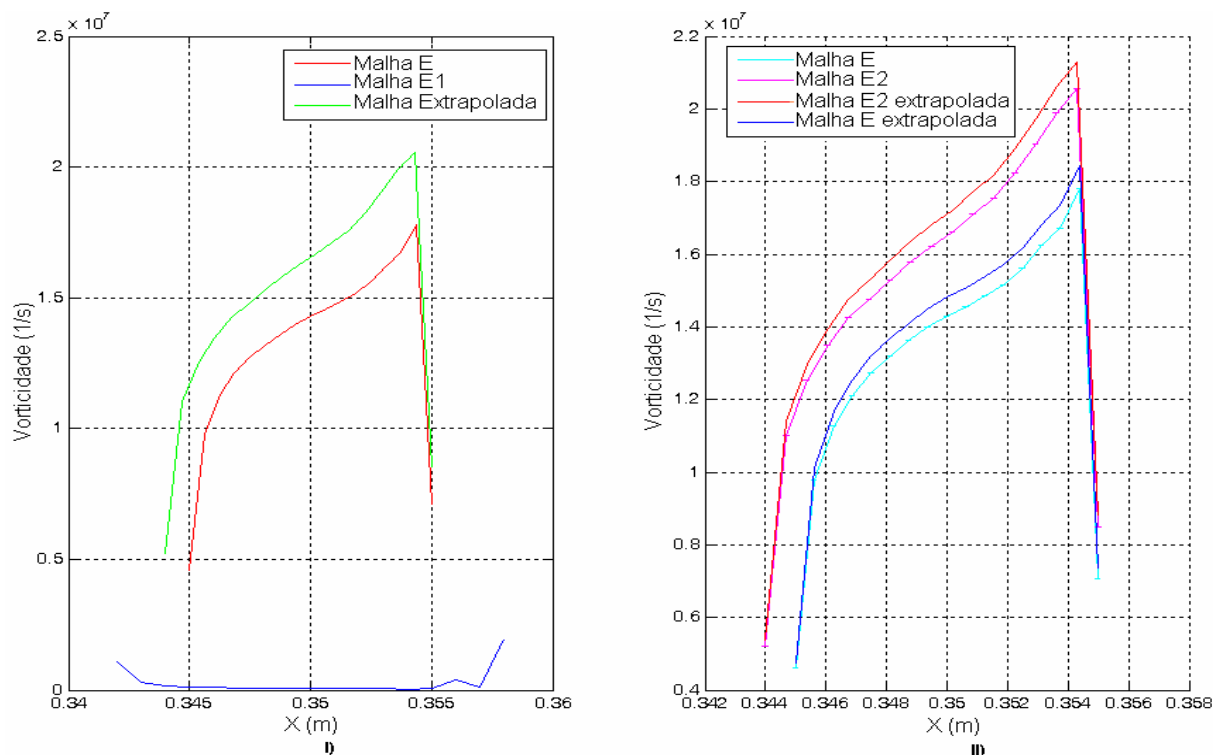


Figura 7: I) Solução numérica da magnitude da vorticidade obtida para as malhas de maior nível de refino E, E1 e E2. II) Malhas E e E2 com a incerteza numérica associada, e suas respectivas extrapolações.

Tais resultados motivaram a construção de malhas mais refinadas na região de intersecção. No entanto, tal adaptação do grid não propiciou de forma adequada a aplicação de esquemas extrapolativos, em decorrência persistência de convergência oscilatória.

A figura 8, ilustra o contorno dos resultados numéricos obtidos para o termo fonte na região de intersecção:

Segue abaixo a distribuição dos termos fontes na linha 2 dada pela figura 9.

A intensidade turbulenta elevada na região de intersecção para a malha com borda curva torna a existência de termos fontes tipo quadrupolo associado às flutuação locais de velocidade turbulenta, mais proeminente em comparação às demais malhas com diferentes tipos de borda.

5. Conclusão

Através da aplicação do método extrapolativo GCI, a inferência da solução analítica estimada do perfil de velocidade e da magnitude da vorticidade na região de borda foi feita. A significativa redução do perfil de velocidade para as três regiões de borda analisadas foi verificada. No entanto, a ação de um transiente que pudesse acarretar uma variabilidade no perfil não foi obtido nas simulações numéricas efetuadas, de modo que pela figura 5, a semelhança dos perfis obtidos quando comparados aos resultados experimentais de escoamentos turbulentos (plenamente desenvolvido) em dutos é notória.

O comportamento assintótico para uma lei de potência pode ser inferido diretamente a partir da citada semelhança dos perfis.

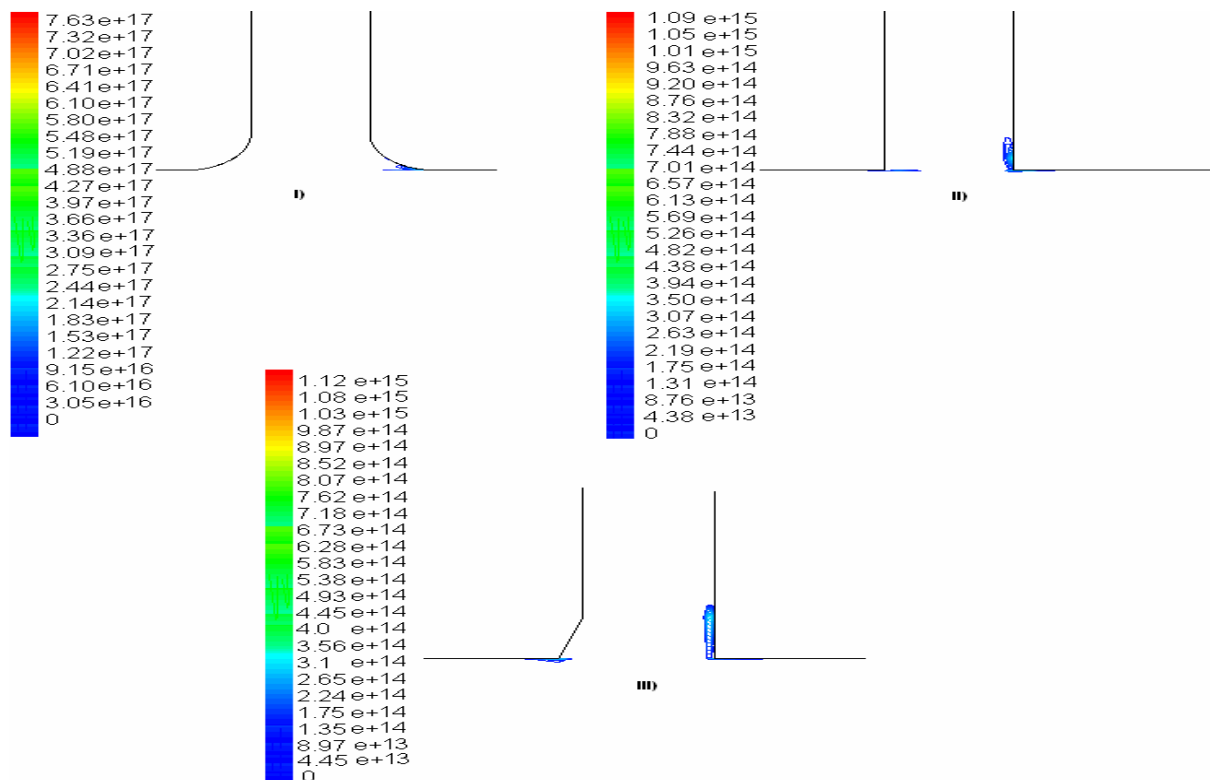


Figura 8: Distribuição dos termos de Lilley para os três tipos de bordas analisadas, I) Malha E1, II) Malha E, III) Malha E2 obtidos através do algoritmo SNGR.

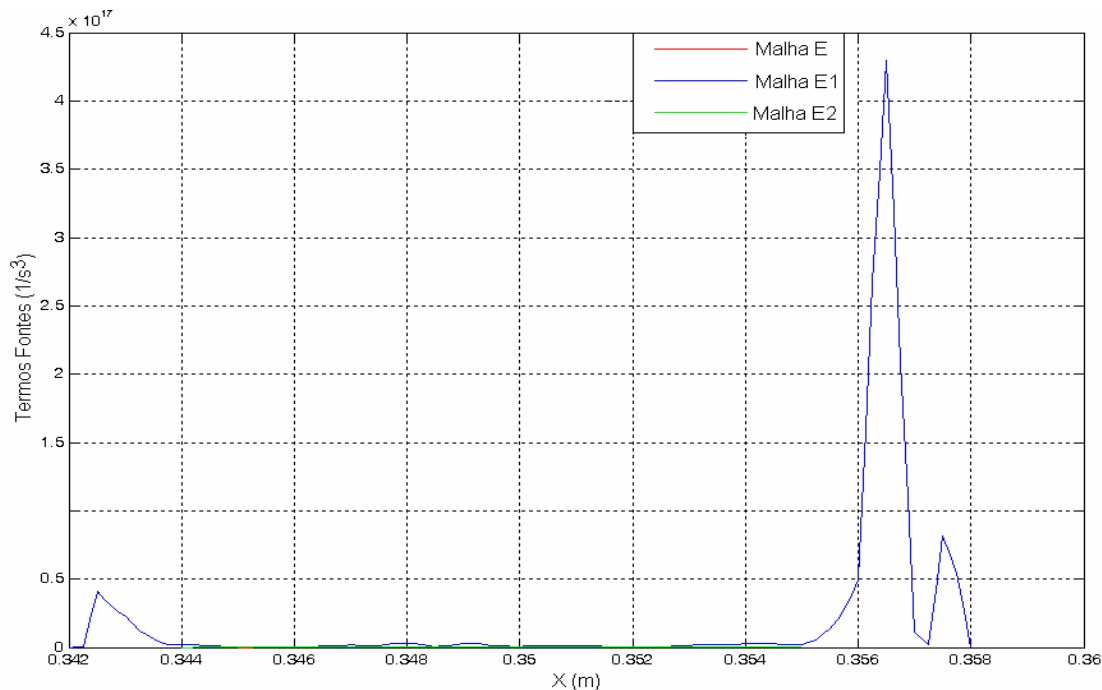


Figura 9: Distribuição dos termos de Lilley para os três tipos de bordas analisadas (Malhas E, E1, E2) obtidos através do algoritmo SNGR.

A variação da magnitude da vorticidade têm um forte impacto na amplitude dos movimentos oscilatórios da camada cisalhante. Esta oscilação caracteriza a existência das auto oscilações citadas anteriormente. Os resultados numéricos mostram um significativo aumento da vorticidade na borda posterior, notando um progressivo aumento da mesma, após a metade da região de abertura. A aplicação das equações de Navier Stokes sem restrições, é fundamental para a verificação da hipótese da variabilidade da magnitude de vorticidade após metade da região de abertura (Colonius, 2002) em decorrência da interação entre o campo acústico e o escoamento na região de borda.

O uso do algoritmo SNGR na região de borda mostrou a contribuição local de fontes sonoras vinculadas à flutuação de velocidade turbulenta na referida região. Os termos Lilley representam o mesmo tipo de fonte que seria produzida por termos fontes do tipo quadrupolo (Goldstein, 1984). Localmente, os resultados obtidos para a linha 2 ilustram que a malha com borda curva apresenta um alto valor dos termos de Lilley, devido ao fato do gradiente de flutuação local de velocidade ser mais significativo em comparação as demais bordas.

6. Bibliografia

- Li, Dipperman J.S., 2004, "On the design of long T-shaped acoustic resonators", *J.Acoust.Soc.Am.*, 116 (5), pp. 2785-2792.
- Colonius, T., Rowley, C.W., Basu, A.T., 2002, "On Self Sustained Oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities", *J.Fluid Mech.*, vol:455, pp. 315-346.
- Colonius T, Lele SK, Moin P. , 1997, "Sound generation in a mixing layer", *J. Fluid Mech.*, vol:330, pp.375-409.
- Goldstein ME., 1984, "Aeroacoustics of turbulent shear flows" *Annu.Rev.Fluid.Mech.* vol:16, pp.263-285.
- Wang M., Freund JB, Lele SK., 2006, "Computational Prediction of Flow-Generated Sound", *Annu. Rev.Fluid.Mech*, vol:38, pp. 483-512.
- FLUENT INC., Fluent, Version 6.2.16, USA, 2005.
- Marchi, C.H., Silva, A.F.C., 1999, "Condições Suficientes para estimar com acurácia e confiabilidade erros de discretização em CFD", *Computational Methods in Engineering*, 20/04/2008, < http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/artigos/marchi_silva_CILAMCE99.pdf >.
- Celik, I., 2004 "Procedure for Estimation and Reporting of Discretizations Error in CFD Applications", *ASME Journal of Fluids Engineering*, 01/06/2008 <<http://www.asme.org/pubs/journals/fluideng/JFENumaccuracy.pdf>>
- Howe, M.S., 1997, "Low Strouhal number instabilities of flow over apertures and wall cavities", *J.Acoust.Soc.Am.*, 102 (2), pp. 772-780.