

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

José Pedro de Santana Neto

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ACÚSTICA INTERNA DE DUTOS**

Florianópolis

2016

José Pedro de Santana Neto

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ACÚSTICA INTERNA DE DUTOS**

Dissertação submetido ao Programa
de Pós-Graduação para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Andrey Ricardo da Silva,
Ph.D.

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da
UFSC.

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor

Maiores informações em:
<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

José Pedro de Santana Neto

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA ACÚSTICA INTERNA DE DUTOS

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.

Florianópolis, 15 de Junho 2016.

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador

Banca Examinadora:

Primeiro membro
Universidade ...

Andrey Ricardo da Silva, Ph.D.
Orientador

Segundo membro
Universidade ...

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço bla bla bla.

Texto da Epígrafe. Citação relativa ao tema do trabalho. É opcional. A epígrafe pode também aparecer na abertura de cada seção ou capítulo.

(Autor da epígrafe, ano)

RESUMO

O texto do resumo deve ser digitado, em um único bloco, sem espaço de parágrafo. O resumo deve ser significativo, composto de uma sequência de frases concisas, afirmativas e não de uma enumeração de tópicos. Não deve conter citações. Deve usar o verbo na voz passiva. Abaixo do resumo, deve-se informar as palavras-chave (palavras ou expressões significativas retiradas do texto) ou, termos retirados de thesaurus da área.

Palavras-chave: Palavra-chave 1. Palavra-chave 2. Palavra-chave 3.

ABSTRACT

Resumo traduzido para outros idiomas, neste caso, inglês. Segue o formato do resumo feito na língua vernácula. As palavras-chave traduzidas, versão em língua estrangeira, são colocadas abaixo do texto precedidas pela expressão “Keywords”, separadas por ponto.

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Magnitudes do coeficiente de reflexão $ R $	30
Figura 2	Coeficientes de correção de terminação l/a	31
Figura 3	Elaborado pelo autor.	39

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIACÕES

LISTA DE SÍMBOLOS

$\ R\ $	Magnitude do coeficiente de reflexão
l	Coeficiente de correção da terminação
a	Raio do duto
R_r	Coeficiente de reflexão
Z_r	Impedância de radiação
Z_0	Impedância característica do meio
i	Número imaginário
k	Número de onda
ka	Número de helmholtz
Kp	Fator de perda

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 CONTEXTO	25
1.2 PROBLEMA	26
1.3 OBJETIVOS	27
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3 METODOLOGIA.....	35
4 RESULTADOS	37
5 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Sistemas de fluxo de massa (exaustão e sucção) possuem uma forte colaboração na composição de sons e ruídos. Escapamentos, sistemas de ventilação, buzinas, motores aeronáuticos e aspiradores de pó são exemplos desses sistemas que estão altamente presentes no dia-a-dia. Cada vez mais a sociedade vem desenvolvendo consciência crítica dos danos que os ruídos desses tipos de sistemas podem acarretar a saúde da população. Tal fato é tão preponderante que, como é apresentado por Munjal (1987), desde os anos da década de 1920 há registros de esforços para entender e caracterizar esses tipos sistemas afim de colaborar com a manutenção e desenvolvimento de ambientes saudáveis no contexto acústico.

Há vários elementos estruturais que podem compor sistemas de exaustão, mas os dutos circulares se caracterizam como fundamentais e bastante presentes. Sua forma cilíndrica permite que vários fenômenos físicos possam ocorrer e interagir entre si, principalmente os fenômenos acústicos e de fluxo de massa (escoamentos). De acordo também com Munjal (1987), o corpo de estudos e conhecimentos da acústica interna de dutos está bem estabelecido, mas verifica-se na literatura vários questionamentos sobre o funcionamento do mesmo na presença de escoamentos (fenômenos aeroacústicos). Em vista disso, determinar a caracterização da acústica interna de dutos é de extrema importância visto as várias tecnologias relacionadas a sistemas de exaustão sem um amparo técnico bem estabelecido da literatura no ponto de vista da aeroacústica.

Em geral, pode-se utilizar dois parâmetros para caracterizar o fenômeno da acústica interna de dutos:

- a magnitude do coeficiente de reflexão $\|R\|$, razão entre as componentes refletida e incidente da onda no duto;
- coeficiente de correção da terminação normalizado pelo raio do duto l/a em que a é o raio do duto. Tal parâmetro representa o comprimento acústico efetivo do duto. Em outras palavras, o fator l é a quantidade adicional medida a partir da abertura do duto a qual se deve propagar a onda incidente antes de ser refletida para o interior do duto com fase invertida.

Com o uso desses dois parâmetros pode-se projetar dutos com um comportamento acústico adequado a diversas situações que exigem atenuação de ruídos em certas frequências, além de poder prever com mais acurácia já que grande parte dos estudos consideram a acústica interna de dutos sem escoamentos.

1.2 PROBLEMA

Com relação ao contexto abordado, a solução exata para o problema de um duto circular não flangeado na ausência de escoamento foi proposta por Levine e Schwinger (1948). A solução assume que a espessura das paredes do duto são desprezíveis e o fluido é invíscido. A partir destas simplificações, as expressões exatas para $\|R\|$ e l são obtidas utilizando-se a técnica de Wiener-Hopf.

Apesar da utilidade do modelo de Levine e Schwinger, em boa parte das aplicações práticas, dutos circulares transportam escoamentos médios. Para tais circunstâncias, Munt (1990) propôs um modelo analítico exato, também baseado na técnica de Wiener-Hopf, em que se considera a presença de um escoamento subsônico no interior do duto. Considera-se nesse modelo as premissas de que o escoamento é uniforme, invíscido e que a camada cisalhante do jato é infinitamente fina. Além disso, o modelo considera a condição de Kutta na borda do duto para lidar com a singularidade da velocidade de partícula nesta região.

É importante ressaltar que modelos exatos para os parâmetros de radiação de dutos se limitam a condições de contorno simples. No entanto, observa-se na prática situações diversas em que há presença de escoamentos de exaustão e sucção com diversas geometrias. Para estes casos, não existem modelos que considerem a influência do escoamento nas propriedades de radiação. Tal fato é bastante crítico pois o comportamento acústico de um sistemas submetidos a fluxos de massa muda consideravelmente.

No entanto, com o advento de novas tecnologias computacionais, é possível realizar procedimentos numéricos extremamente complexos com certa agilidade e precisão. *Softwares* como ANSYS (2017), COMSOL (2017) e PowerFLOW (2017) possuem a viabilidade de realizar cálculos de fluido dinâmica computacional de sistemas complexos como carros e aviões. Essa capacidade técnica é oriunda em maior parte pelas tecnologias de processamento paralelo multinúcleo de processadores e implementações de seus respectivos *softwares* protocolos como Open

MPI Project (2017). Essa evolução tecnológica é fundamental para esse presente trabalho e vem sendo essencial também para o surgimento de outras ferramentas, que dão suporte a exploração e descoberta de novos fenômenos físicos, antes muitas vezes inviáveis de estudar por alto custo de bancadas experimentais ou alta complexidade na consolidação de um modelo matemático representativo.

1.3 OBJETIVOS

Considerando a problemática discutida acima, o objetivo principal desse trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para análise do comportamento acústico interno de dutos na presença de escoamentos de baixo número de Mach ($M < 0,2$).

Tem-se como objetivos específicos:

- implementar e validar o método numérico e condições de contorno no ponto de vista acústico;
- implementar, validar e analisar o comportamento acústico interno de dutos não flangeados sem escoamento e com ondas planas;
- implementar, validar e analisar o comportamento acústico interno de dutos não flangeados com escoamento de exaustão e com ondas planas;
- implementar, validar e analisar o comportamento acústico interno de dutos não flangeados com escoamento sugado e com ondas planas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho está organizado em capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica do problema de acústica de dutos e a aplicação do método de *lattice* Boltzmann nesse contexto. O capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho, apresentação do método numérico de *lattice* Boltzmann, o *software* desenvolvido como ferramenta computacional e o esquemático do modelo numérico. O capítulo 4 apresenta os resultados da implementação computacional, validações do modelo e análises com diferentes condições de escoamento. O capítulo 5 apresenta as conclusões e evoluções futuras do trabalho. Segue no final referências bibliográficas, apêndices e anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A propagação de modos normais (ondas planas) é um problema clássico em acústica e continua tendo importância significativa diante ao advento de novas tecnologias relacionadas a sistemas de exaustão e sucção. Em geral, pode-se utilizar dois parâmetros para caracterizar o fenômeno da acústica interna de dutos:

- a magnitude do coeficiente de reflexão $\|R\|$, razão entre as componentes refletida e incidente da onda no duto, a qual é dada por

$$R_r = \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0}, \quad (2.1)$$

sendo Z_r a impedância de radiação e Z_0 a impedância característica do meio;

- coeficiente de correção da terminação normalizado pelo raio do duto l/a em que a é o raio do duto. Tal parâmetro representa o comprimento acústico efetivo do duto. Em outras palavras, o fator l é a quantidade adicional medida a partir da abertura do duto a qual deve propagar a onda incidente antes de ser refletida para o interior do duto com fase invertida. Tal coeficiente de correção da terminação l é dado por

$$l = \frac{1}{k} \arctan\left(\frac{Z_r}{Z_0 i}\right) \quad (2.2)$$

sendo k o número de onda.

Em relação aos parâmetros discutidos acima, a solução exata para o problema de um duto não flangeado na ausência de escoamento foi proposta por Levine e Schwinger (1948). A solução assume que a espessura das paredes do duto são desprezíveis e o fluido é invíscido. A partir destas simplificações, as expressões exatas para $\|R\|$ e l são obtidas utilizando-se a técnica de Wiener-Hopf.

Apesar da utilidade do modelo de Levine e Schwinger, em boa parte das aplicações práticas, dutos transportam escoamentos médios. Para tais circunstâncias, Munt (1990) propôs um modelo analítico exato, também baseado na técnica de Wiener-Hopf, em que se considera a presença de um escoamento subsônico no interior do duto. Considera-se nesse modelo as premissas de que o escoamento é uniforme, invíscido

e que a camada cisalhante do jato é infinitamente fina. Além disso, o modelo considera a condição de Kutta na borda do duto para lidar com a singularidade da velocidade de partícula nesta região. As Figuras 1 e 2 apresentam as comparações entre casos com e sem escoamento para um duto não flangeado em termos de $\|R\|$ e l/a .

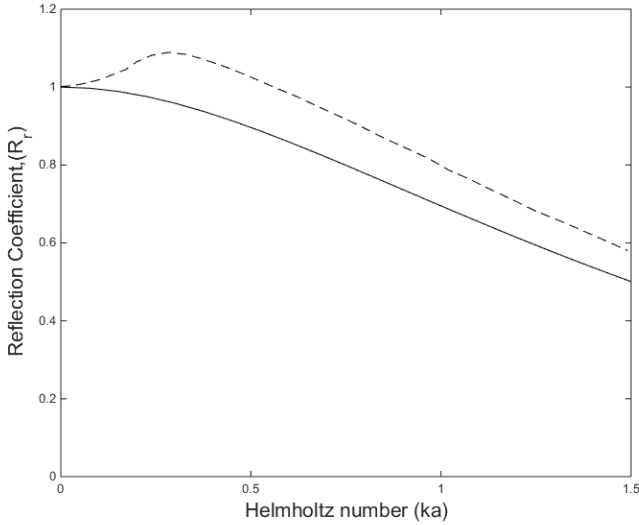


Figura 1: Resultados analíticos exatos para magnitude do coeficiente de reflexão $\|R\|$ ao final de um duto não flangeado. A linha contínua apresenta o resultado sem escoamento de Levine e Schwinger (1948) e a linha tracejada apresenta o resultado com escoamento de $Mach = 0,15$ de Munt (1990).

Como é mostrado na Figura 1, a magnitude do coeficiente de reflexão $\|R\|$ aumenta consideravelmente na presença de um escoamento subsônico. Além disso, pode-se perceber que, em algumas frequências, $\|R\|$ torna-se maior do que a unidade, implicando que a amplitude da onda refletida torna-se maior do que a da onda incidente. Este fenômeno ocorre, sobretudo, pela transferência de energia cinética rotacional do escoamento para o campo acústico. Essa transferência de energia cinética ocorre sobretudo pelo desprendimento periódico de vórtices na borda do duto.

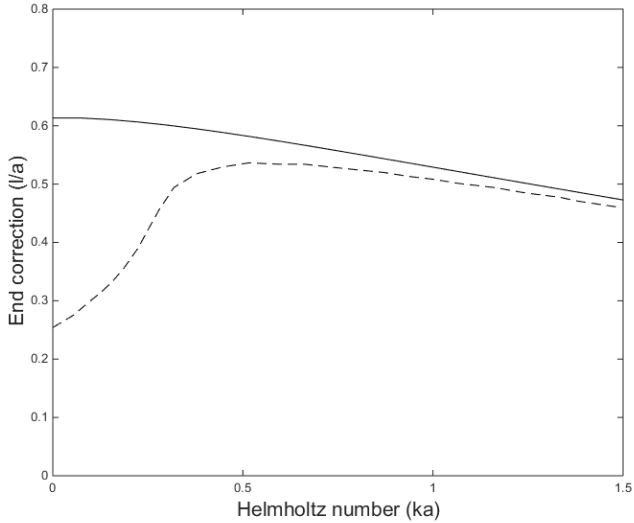


Figura 2: Resultados analíticos exatos para o coeficiente de correção da terminação normalizado pelo raio l/a de um duto não flangeado. A linha contínua apresenta o resultado sem escoamento de Levine e Schwinger (1948) e a linha tracejada apresenta o resultado com escoamento de Mach = 0,15 de Munt (1990).

De acordo com a Figura 2, a correção normalizada da terminação l/a torna-se consideravelmente menor do que aquela obtida na ausência de escoamento, sobretudo para baixos números de helmholtz (ka). Em outras palavras, para baixas frequências e na presença de um escoamento a onda acústica é refletida em uma região mais próxima da abertura, em comparação à situação sem escoamento.

No que diz respeito a modelos analíticos aproximados, o trabalho de Carrier (1955) foi um dos primeiros a abordar o cálculo do coeficiente de reflexão e correção da terminação com escoamento de exaustão num duto não flangeado. Para tal foi considerado um gás perfeito invíscido com o tipo de escoamento uniforme (*plug*). Nessa abordagem usou-se a mesma metodologia que Levine e Schwinger (1948) porém acoplando à formulação matemática o método de Prandtl-Glauert.

Mani (1973) deu prosseguimento a mesma abordagem de Carrier (1955) com escoamento de exaustão, porém considerando a continuidade do deslocamento das partículas acústicas transversais. Esse tipo

de solução mostra diversos fenômenos antes não previstos com os outros modelos citados como efeitos de convecção, zonas de silêncio relativo e refrações.

Também na mesma linha de desenvolvimento de Carrier (1955), Savkar (1975) desenvolveu um modelo de modos de alta ordem com escoamento de exaustão e sucção do tipo *plug* com variação de temperatura. A continuidade do deslocamento das partículas acústicas transversais também foi considerada, possibilitando assim análises de fenômenos de convectivos.

Rienstra (1980) também desenvolveu um modelo matemático aproximado para o cálculo dos coeficientes de reflexão e terminação do duto não flangeado. A contribuição desse trabalho foi a inclusão dos parâmetros do meio externo ao duto como velocidade do som, densidade e velocidade de escoamento. Com esse modelo foi possível investigar como o meio externo influencia na acústica interna do duto e as limitações da condição de Kutta.

Em relação a trabalhos experimentais, Ingard e Singhal (1975) investigaram o coeficiente de reflexão em dutos quadrados em regime de escoamento succionado de Mach 0,4. O método de medição se baseou na técnica de dois microfones e os mesmos foram ajustados para números de helmholtz (ka) menores que 0,5. Em vista desse contexto experimental, o autor desenvolveu uma fórmula analítica para o cálculo do coeficiente de reflexão.

Na mesma linha de investigação, Davies (1987) investigou o coeficiente de reflexão porém com dutos circulares não flangeados e flangeados. O autor destaca que a disposição geométrica da terminação do duto, quando submetida a fenômenos de escoamentos succionados, desenvolve a chamada *vena contracta*, que pode ser estimada e associada com o fator de perda K_p . Em vista dos procedimentos desse trabalho, o autor compara os resultados com o estudo de Ingard e Singhal (1975) e sugere um aperfeiçoamento na equação analítica do cálculo do coeficiente de reflexão.

No que diz respeito a escoamentos de exaustão o trabalho de Al-lam e Åbom (2006) abordou um sistema super determinado de medição para investigação da acústica interna de um duto não flangeado. Para contornar a dificuldade de medição do coeficiente de correção da terminação do duto, surgiu-se como motivação o desenvolvimento de um sistema em que há mais microfones do que incógnitas a serem calculadas, em outras palavras, estendeu-se a metodologia de medição de 2 microfones para mais que 4 microfones. Há de se considerar também que a parte imaginária do número de onda, parte associada com a

dissipação de energia por viscosidade, não pode ser obtida quando há escoamento e por isso foi incluída como incógnita. Em linhas gerais esse trabalho permitiu a validação experimental do trabalho de Munt (1990) e a consolidação de um sistema confiável de medição para esse tipo de problema.

English (2010) investigou também de forma experimental os coeficientes de reflexão e de terminação de dutos circulares com diferentes espessuras. Focando para números de Mach entre 0 e 0,3, seus resultados mostram que os coeficientes de reflexão estão com valores acima dos que são encontrados no trabalho de Munt (1990). O autor explica esse fato relatando que a condição de Kutta subestima o surgimento de vórtices na saída do duto.

3 METODOLOGIA

4 RESULTADOS

5 CONCLUSÕES

Neste tópico será abordado a duração de cada uma das etapas de trabalho como pode ser visto na Figura 3. Desta forma será possível uma melhor organização do mesmo.

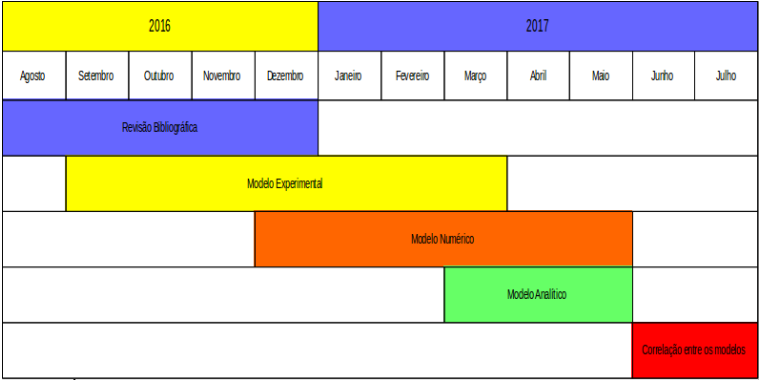


Figura 3: Elaborado pelo autor.

REFERÊNCIAS

- ALLAM, S.; ÅBOM, M. Investigation of damping and radiation using full plane wave decomposition in ducts. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 292, n. 3, p. 519–534, 2006.
- ANSYS, I. *ANSYS Home page*. 2017. Disponível em: <https://www.ansys.com>.
- CARRIER, G. *Sound transmission from a tube with flow*. [S.l.], 1955.
- COMSOL, I. *COMSOL Home page*. 2017. Disponível em: <https://br.comsol.com>.
- DAVIES, P. Plane wave reflection at flow intakes. *Journal of sound and vibration*, Academic Press, v. 115, n. 3, p. 560–564, 1987.
- ENGLISH, E. J. *A measurement based study of the acoustics of pipe systems with flow*. Tese (Doutorado) — University of Southampton, 2010.
- INGARD, U.; SINGHAL, V. K. Effect of flow on the acoustic resonances of an open-ended duct. *The Journal of the Acoustical Society of America*, ASA, v. 58, n. 4, p. 788–793, 1975.
- LEVINE, H.; SCHWINGER, J. On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical review*, APS, v. 73, n. 4, p. 383, 1948.
- MANI, R. Refraction of acoustic duct waveguide modes by exhaust jets. 1973.
- MUNJAL, M. L. *Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1987.
- MUNT, R. Acoustic transmission properties of a jet pipe with subsonic jet flow: I. the cold jet reflection coefficient. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 142, n. 3, p. 413–436, 1990.
- POWERFLOW, I. *EXA Home page*. 2017. Disponível em: <http://exa.com/en/product/simulation-tools/powerflow-cfd-simulation>.
- PROJECT, O. M. *Open MPI Project Home page*. 2017. Disponível em: <https://www.open-mpi.org>.

RIENSTRA, S. On the acoustical implications of vortex shedding from an exhaust pipe. *American Society of Mechanical Engineers*, v. 1, p. 17–21, 1980.

SAVKAR, S. Radiation of cylindrical duct acoustic modes with flow mismatch. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 42, n. 3, p. 363–386, 1975.