

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

José Pedro de Santana Neto

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ACÚSTICA INTERNA DE DUTOS COM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE CONTORNO**

Florianópolis

2016

José Pedro de Santana Neto

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ACÚSTICA INTERNA DE DUTOS COM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE CONTORNO**

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 COM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE CONTORNO**

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	Exemplos de várias terminações de dutos circulares.....	28
Figura 2	Elaborado pelo autor.	41

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIACÕES

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 CONTEXTO	25
1.2 PROBLEMA	26
1.3 OBJETIVOS	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3 MÉTODO DE LATTICE BOLTZMANN	31
4 PALABOS	33
5 MODELOS NUMÉRICOS	35
6 VALIDAÇÕES	37
7 RESULTADOS	39
8 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Sistemas de exaustão hoje em dia possuem uma forte colaboração na composição de sons e ruídos. Escapamentos, sistemas de ventilação, buzinas e motores aeronáuticos são exemplos desses sistemas que estão altamente presentes no dia-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 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, a qual é dada por

$$R_r = \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0}, \quad (1.1)$$

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

$$l = \frac{1}{k} \arctan\left(\frac{Z_r}{Z_0 i}\right) \quad (1.2)$$

sendo k o número de onda.

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 às condições geométricas simples. No entanto, observa-se na prática terminações cujas geometrias divergem significativamente daquela associadas a um duto não flangeado. Exemplos comuns destas geometrias são aquelas encontradas em difusores, chaminés, sistemas de exaustão, *nozzles* e instrumentos musicais. A Figura 1 ilustra casos mais realistas de terminação de dutos comumente

encontrados na prática. Para estes casos, não existem modelos que considerem a influência do escoamento nas propriedades de radiação. Além disso, a análise numérica considerando os efeitos de escoamento não é trivial.

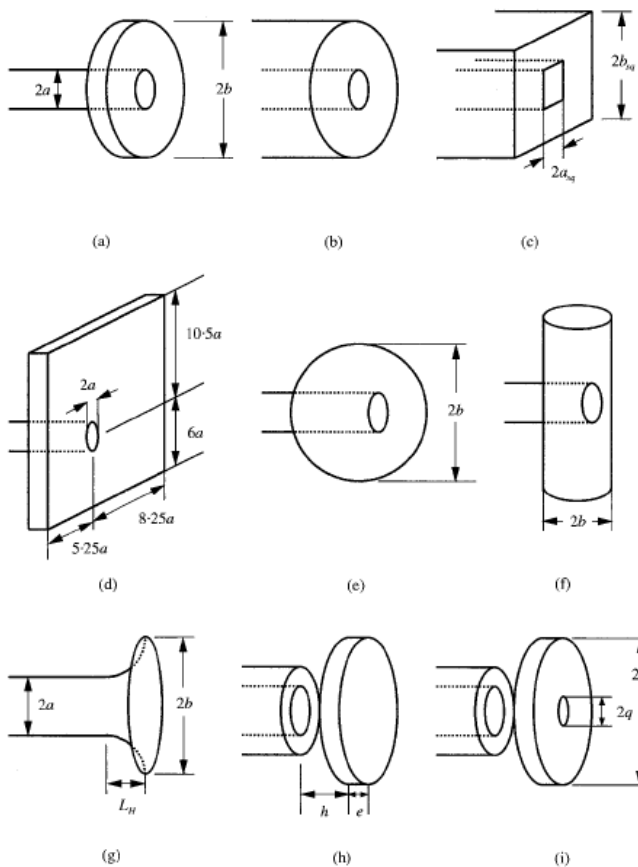
No entanto, com o advento de novas tecnologias computacionais, é possível realizar procedimentos numéricos extremamente complexos com certa agilidade e precisão. *Softwares* como ANSYS (2017) e COMSOL (2017) possuem a viabilidade de realizar cálculos de fluido dinâmica computacional de sistemas complexos 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* gerenciadores como Open MPI Project (2017). Essa evolução tecnológica vem sendo essencial para o surgimento de novas ferramentas para a exploração e descoberta de 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 com diferentes condições de contorno na presença de escoamentos de baixo número de Mach ($M < 0,2$).

Tem-se como objetivos específicos:

- modelar e analisar o comportamento acústico de dutos não flanqueados sem escoamento;
- modelar e analisar o comportamento acústico de dutos não flanqueados com escoamento de saída;
- modelar e analisar o comportamento de dutos terminados por difusores do tipo corneta cilíndrica com diferentes raios e escoamento de saída;
- modelar e analisar o comportamento acústico interno de dutos com escoamento sugado e diferentes geometrias de terminação.



Fonte: (DALMONT et al., 2001)

Figura 1: Exemplos de vários tipos de terminações: (a) flange circular; (b) flange circular com espessura do duto; (c) duto quadrado com flange de espessura quadrada; (d) flange normalizada; (e) flange esférica; (f) flange cilíndrica; (g) corneta; (h) disco não perfurado; (i) disco perfurado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3 MÉTODO DE LATTICE BOLTZMANN

4 PALABOS

5 MODELOS NUMÉRICOS

6 VALIDAÇÕES

7 RESULTADOS

8 CONCLUSÕES

Neste tópico será abordado a duração de cada uma das etapas de trabalho como pode ser visto na Figura 2. Desta forma será possível uma melhor organização do mesmo.

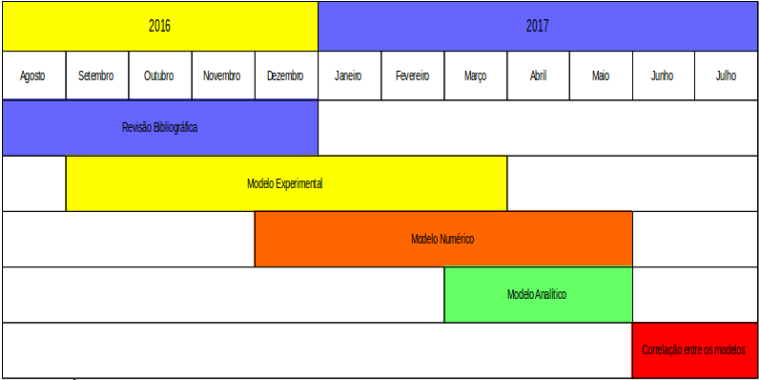


Figura 2: Elaborado pelo autor.

REFERÊNCIAS

ANSYS, I. *ANSYS Home page*. 2017. Disponível em: <https://www.ansys.com>.

COMSOL, I. *COMSOL Home page*. 2017. Disponível em: <https://br.comsol.com>.

DALMONT, J.-P.; NEDERVEEN, C.; JOLY, N. Radiation impedance of tubes with different flanges: numerical and experimental investigations. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 244, n. 3, p. 505–534, 2001.

LEVINE, H.; SCHWINGER, J. On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical review*, APS, v. 73, n. 4, p. 383, 1948.

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.

PROJECT, O. M. *Open MPI Project Home page*. 2017. Disponível em: <https://www.open-mpi.org/>.