

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO**

**UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES  
COMPUTACIONAIS COMO FERRAMENTA  
DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO EM  
INDÚSTRIA DE ALTO-FALANTES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**John William Skalee**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

# **UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO EM INDÚSTRIA DE ALTO-FALANTES**

**John William Skalee**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Mobilidade Sustentável, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para título de **Mestre em Engenharia de Produção**

**Orientador: Prof. Eric Brandão, Dr. Eng.**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Skalee, John William

Utilização de simulações computacionais como ferramenta de desenvolvimento de produto em indústria de alto-falantes / por John William Skalee. – 2015.

175 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Eric Brandão, Dr. Eng.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2015.

1. Desenvolvimento de produto. 2. Simulação computacional.  
3. Caracterização de materiais. 4. Elementos finitos. 5. Alto-falante.  
I. Brandão, Dr. Eng., Eric. II. Título.

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a John William Skalee. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: john@feevale.br

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMO  
FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO EM  
INDÚSTRIA DE ALTO-FALANTES**

elaborada por  
**John William Skalee**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia de Produção**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Eric Brandão, Dr. Eng.,**  
(Presidente/Orientador)

**Leoni Pentiado Godoy, Dra. Eng. (UFSM)**

**William D'Andrea Fonseca, Dr. Eng. (UFSM)**

Santa Maria, 24 de abril de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a algo extraordinário que não sei explicar, apenas aprendi a chamar de DEUS. Agradeço incondicionalmente ao apoio de meus pais e principalmente ao incentivo de sempre buscar conhecimento e inovar em qualquer etapa de minha vida.

Não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr. Eric Brandão, que incansavelmente auxiliou e conduziu esta pesquisa. Cabe uma citação especial para seu grande empenho em busca de unificar os conhecimentos da indústria com a universidade. Aliar a prática com a teoria, parece simples, mas o penhasco que existe entre a aplicação na indústria e o conceito na sala de aula é extremamente grande. Como diz um ditado popular, ficar apenas na teoria é como ir a um restaurante e querer saciar a fome apenas lendo o cardápio. Desta forma, ficam os meus sinceros agradecimentos a este grande homem e excelente profissional.

*“Todos nós desejamos o progresso, mas se você está na estrada errada, progresso significa fazer o retorno e voltar para a estrada certa; nesse caso, o homem que volta atrás primeiro é o mais progressista”*

— C.S. LEWIS

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção  
Universidade Federal de Santa Maria

### **UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO EM INDÚSTRIA DE ALTO-FALANTES**

AUTOR: JOHN WILLIAM SKALEE

ORIENTADOR: ERIC BRANDÃO, DR. ENG.

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 24 de abril de 2015.

O presente estudo esteve focado no desenvolvimento de produto e teve por objetivo verificar os benefícios da utilização da simulação computacional como ferramenta de projeto na indústria de alto-falantes. Para isso, toda a etapa de desenvolvimento de produto de uma empresa do ramo de alto-falantes foi analisada comparando o método tradicional, que utiliza interações entre protótipos e experimentos, com a filosofia embasada no uso da modelagem computacional. A modelagem computacional foi realizada através do método dos elementos finitos. Sabe-se que, com a competição acirrada do mercado, as organizações buscam alternativas em ferramentas, processos e tecnologias que as tragam algum diferencial e acrescentem valor ao produto final, e assim as diferencie das empresas concorrentes. Como premissa para o uso de simulações computacionais, se faz necessário a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados na confecção do alto-falante. Portanto, o estudo também apresentou e implementou um método capaz de obter com precisão as propriedades mecânicas necessárias, tais como: Módulo de Young, amortecimento, densidade, etc. Embora o estudo esteja focado em uma indústria de alto-falantes, esta pesquisa também se aplica às organizações que possuem a etapa de desenvolvimento de produto em seu fluxo de operações. Através desta comparação de métodos, a pesquisa possibilita aos gestores responsáveis pelo desenvolvimento do produto, a busca por crescimento sustentável melhorando a posição competitiva e reduzindo a vulnerabilidade de sua permanência no mercado. Nesse sentido é proposto um estudo de caso, avaliando os métodos, a viabilidade e os benefícios gerados através do modelamento computacional, sempre buscando oportunidades que visem assegurar a geração de valor para o produto e consequentemente para o cliente final.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento de produto. simulação computacional. caracterização de materiais. elementos finitos. alto-falante.

# ABSTRACT

Master's Dissertation  
Graduate Program in Production Engineering  
Federal University of Santa Maria

## USE OF COMPUTER SIMULATIONS AS A PRODUCT DEVELOPMENT TOOL IN SPEAKER INDUSTRY

AUTHOR: JOHN WILLIAM SKALEE

ADVISOR: ERIC BRANDÃO, DR. ENG.

Defense Place and Date: Santa Maria, April 24<sup>st</sup>, 2015.

The present study is focused on product development and aims to verify the benefits of the use of computer simulation as a design tool in the industry speakers. For this reason every stage of a product development company in the speakers will be analyzed comparing the traditional method, which uses interactions between prototypes and experiments with the organization based on computational modeling philosophy. Computer modeling will be performed using the finite element method. It is known that with the fierce market competition, organizations are seeking alternatives in tools, processes and technologies that will bring some difference and add value to the final product, and thus differentiate itself from competitors. As a premise for the use of computer simulations, the characterization of the mechanical properties of the materials used in making the speaker is required. Therefore, the paper also proposes to implement a method capable of accurately obtaining the necessary mechanical properties such as Young's modulus, damping, density, etc. Although the study is focused on an industry speakers, this research also applies to organizations that have the stage of product development in their deal flow. Through this comparison methods, the research aims to enable managers responsible for product development, the pursuit of sustainable growth by enhancing the competitive position and reducing the vulnerability of their stay in the market. In this sense we propose a case study, evaluating methods, the feasibility and benefits generated through computational modeling, always seeking opportunities that aim to ensure the creation of value for the product and hence to the end customer.

**Keywords:** product development, computational simulation, characterization of materials, finite elements, loudspeaker.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – O mecanismo da inovação. ....	32
Figura 2.2 – Custo $X$ confiabilidade da simulação.....	37
Figura 2.3 – Modelo de pesquisa para simulação. ....	38
Figura 2.4 – Diagrama tradicional de um alto-falante do tipo <i>woofer</i> .....	44
Figura 2.5 – Circuito magnético tradicional de um alto-falante. ....	46
Figura 2.6 – Franjeamento das linhas de campo em CM de um alto-falante característico. ....	48
Figura 2.7 – Alterações nas linhas de campo devido mudança de meio em componentes do CM. ....	49
Figura 2.8 – Circuito magnético otimizado em um CM.....	49
Figura 2.9 – Propostas para ajuste da simetria do franjeamento no CM.....	50
Figura 2.10 – Posicionamento do enrolamento da bobina no <i>gap</i> de um alto-falante.....	50
Figura 2.11 – Dissipação térmica da bobina móvel posicionada no CM. ....	52
Figura 2.12 – Comparação entre diafragmas do tipo domo e cone.....	53
Figura 2.13 – Curva de resposta de um alto-falante do tipo <i>woofer</i> . ....	54
Figura 2.14 – Formas básicas para cones de alto-falantes. ....	56
Figura 2.15 – Frisos para reforço estrutural do cone do AF. ....	56
Figura 2.16 – Diafragma do tipo domo. ....	58
Figura 2.17 – Centragem do alto-falante através da aranha e suspensão. ....	58
Figura 2.18 – Limites da zona de linearidade da centragem de um AF.....	60
Figura 2.19 – Curva de resposta teórica para um alto-falante com suas regiões.....	61
Figura 2.20 – Alterações na curva de resposta do AF geradas por caixas acústicas e sintonias. ....	63
Figura 2.21 – Uso do recurso <i>smoothness</i> em uma curva de resposta de alto-falante.....	64
Figura 2.22 – Curva de resposta fundamental, segunda e terceira harmônica de um AF. ....	65
Figura 2.23 – Fundamental e THD de um alto-falante. ....	66
Figura 2.24 – Curva de THD de um AF em percentual. ....	67
Figura 2.25 – Sinal elétrico de entrada e sinal acústico de saída em um AF. ....	67
Figura 2.26 – Curva de Impedância típica de um <i>woofer</i> .....	70
Figura 2.27 – Parâmetros de um alto-falante. ....	73
Figura 2.28 – Dependência com a frequência. ....	81
Figura 2.29 – Dependência com a temperatura.....	82
Figura 2.30 – Dispositivo para caracterização das propriedades mecânicas dos materiais. ..	83
Figura 2.31 – Modelo acústico do módulo de medição de propriedades mecânicas dos materiais - MPM. ....	83
Figura 2.32 – Função de transferência do corpo de prova. ....	84
Figura 2.33 – Determinação do fator de perda do corpo de prova do material. ....	85
Figura 4.1 – Valores de coercividade de ímãs existentes na biblioteca de materiais do <i>software</i> FEMM. ....	94
Figura 4.2 – Valores de permeabilidade magnética [ $\mu_r$ ] de metais existentes na biblioteca de materiais do <i>software</i> FEMM.....	95
Figura 4.3 – Fluxo de simulação magnética no CM de um alto-falante. ....	95
Figura 4.4 – Valores modelados do fluxo magnético no <i>gap</i> do alto-falante.....	96
Figura 4.5 – Medida de espessura, comprimento e largura do corpo de prova de material utilizado em formas de bobina.....	98

Figura 4.6 – Medida da massa do corpo de prova para determinação de $\rho$ do material utilizado em forma de bobina. ....	98
Figura 4.7 – Variação de densidade nas amostras do Material 1. ....	99
Figura 4.8 – Variação de densidade nas amostras do Material 2. ....	100
Figura 4.9 – Variação de densidade nas amostras do Material 3. ....	100
Figura 4.10 – Variação de densidade nas amostras do Material 4. ....	101
Figura 4.11 – Variação de densidade nas amostras do Material 5. ....	101
Figura 4.12 – Valor de $\rho$ para as amostras dos materiais avaliados que são utilizados em formas de bobina. ....	102
Figura 4.13 – Valor de $\rho$ atribuído para cada material de forma de bobina. ....	103
Figura 4.14 – Valor de $\rho$ atribuído para cada componente do AF. ....	103
Figura 4.15 – Instrumento de medição das propriedades mecânicas - Módulo MPM da Klippel. ....	104
Figura 4.16 – Gabarito para ajuste de comprimento da viga do corpo de prova. ....	105
Figura 4.17 – Posicionamento do laser para leitura da vibração do corpo de prova da amostra. ....	106
Figura 4.18 – Valor de $E$ para as amostras dos materiais de forma de bobina. ....	106
Figura 4.19 – Valor de $\eta$ para as amostras dos materiais utilizados para confecção de forma de bobina. ....	107
Figura 4.20 – Valor de $Q$ para as amostras dos materiais de forma de bobina. ....	108
Figura 4.21 – Valor final de $E$ atribuído para cada material utilizado em forma de bobina. .	108
Figura 4.22 – Valor de $E$ atribuído para cada componente de um AF característico. ....	109
Figura 4.23 – Valor de $\eta$ atribuído para cada material de forma de bobina. ....	109
Figura 4.24 – Alterações na curva de resposta devido a mudança do Coeficiente de Poisson dos materiais. ....	111
Figura 4.25 – Densidades dos materiais do banco de dados de cones/calotas. ....	114
Figura 4.26 – Fator de Perda dos materiais do banco de dados de cones/calotas. ....	114
Figura 4.27 – Fluxo em macro para fabricação do alto-falante. ....	117
Figura 4.28 – Fluxo de operação para fabricação de componente de tecidos utilizados em AF. ....	118
Figura 4.29 – Tecido bruto e com impregnação de resina fenólica. ....	118
Figura 4.30 – Tecido moldado conforme componente. ....	119
Figura 4.31 – Comparação entre tecido bruto e final. ....	119
Figura 4.32 – Indicação de processos de verificação de conformidade na fabricação de componentes para AF. ....	120
Figura 4.33 – Regiões consideradas para modelagem do alto-falante. ....	122
Figura 4.34 – Comparação de custos entre ferramentas CAE. ....	124
Figura 4.35 – Tempo médio de desenvolvimento de alto-falante e suas principais etapas. .	125
Figura 4.36 – Processo de modelagem do Conjunto Magnético do <i>speaker_A</i> . ....	128
Figura 4.37 – Diferença de valores simulados e valores medidos em cada CM. ....	130
Figura 4.38 – Interação de bobina e conjunto magnético. ....	131
Figura 4.39 – Linhas de campo no CM e na bobina do <i>speaker_E</i> . ....	131
Figura 4.40 – Disperção do fluxo ao longo do enrolamento da bobina do <i>speaker_E</i> . ....	132
Figura 4.41 – Indicação da sensibilidade e resposta em frequência de um AF na curva de resposta. ....	135
Figura 4.42 – Região de especificação do alto-falante. ....	136
Figura 4.43 – Comparação dos valores de sensibilidade encontrados para o <i>speaker_A</i> . ...	136

Figura 4.44 – Comparação dos valores da banda de frequência encontrados para o <i>speaker_A</i> . . . . .	138
Figura 4.45 – Inversão de fase entre componentes cone-suspensão no <i>speaker_A</i> . . . . .	139
Figura 4.46 – Identificação através da medição de varredura 3D do sistema móvel do <i>speaker_A</i> . . . . .	140
Figura 4.47 – Identificação da inversão de fase no modelo computacional do <i>speaker_D</i> . . . . .	140
Figura 4.48 – Novas geometrias e formatos propostos para suspensão do <i>speaker_D</i> . . . . .	141
Figura 4.49 – Curva de resposta com diferentes suspensões no <i>speaker_D</i> . . . . .	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fatores que contribuem para o êxito de um novo produto. ....	30
Tabela 2.2 – Valores médios de Remanência para imãs permanentes. ....	47
Tabela 2.3 – Classificação do transdutor conforme sua resposta em frequência. ....	63
Tabela 2.4 – Constantes para os cinco primeiros modos de vibração. ....	80
Tabela 2.5 – Densidade de materiais encontrados em alto-falantes. ....	87
Tabela 4.1 – Limites de operação do módulo MPM - Klippel. ....	105
Tabela 4.2 – Parâmetros mecânicos para cinco materiais utilizados em formas de bobinas. ....	110
Tabela 4.3 – Alterações do Coeficiente de Poisson nos componentes cone e aranha. ....	111
Tabela 4.4 – Materiais utilizados para confecção de cones e calotas. ....	113
Tabela 4.5 – Materiais utilizados para confecção de aranha e suspensão. ....	115
Tabela 4.6 – Materiais utilizados para confecção de formas de bobina. ....	115
Tabela 4.7 – Materiais utilizados como adesivos no alto-falante. ....	116
Tabela 4.8 – Identificação das amostras utilizadas na pesquisa. ....	127
Tabela 4.9 – Diferença entre valores medidos e simulados na região do <i>gap</i> das amostras. ....	129
Tabela 4.10 – Diferença entre valores medidos e simulados no <i>gap</i> / enrolamento. ....	132
Tabela 4.11 – Diferença entre valores medidos e simulados de $\beta l$ ....	133
Tabela 4.12 – Dados de entrada <i>speaker_A</i> – Valores solicitados. ....	134
Tabela 4.13 – Dados de saída <i>speaker_A</i> - Comparação ....	138

## **LISTA DE APÊNDICES**

<b>APÊNDICE A – Memorial de cálculo das medições das propriedades mecânicas dos materiais utilizados em formas de bobinas.....</b>	<b>154</b>
--	------------

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A</b> – <i>Material Parameter Measurement</i> - MPM .....	156
<b>ANEXO B</b> – <i>Cone vibration and radiation diagnostics</i> .....	161
<b>ANEXO C</b> – <i>Scientific design Software</i> - LOUDSOFT .....	171

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Alto-falante
AFA	Arruela de Ferro Aberta
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BT	Boletim Técnico
BP	<i>Business Processes</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CM	Conjunto Magnético
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DFA	<i>Design for Manufacture</i>
DFM	<i>Design for Assembly</i>
DFMEA	<i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>
DNP	Desenvolvimento de Novos Produtos
EUA	Estados Unidos da América
FEA	Análise através de Elementos Finitos
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FRF	Função Resposta em Frequência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LP	<i>Lumped Parameters</i>
LPM	<i>Linear Parameter Measurement</i>
MPM	<i>Material Parameter Measurement</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
SCN	<i>Scanning Vibrometer</i>
SG	<i>Stage-Gates</i>
SM	Sistema Móvel
SPL	<i>Sound Pressure Level</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TRF	<i>Transfer Function Response</i>

TS Thiele-Small

TW *Tweeter*



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{F}_{\text{mag}}$	Força eletromagnética da bobina do alto-falante [N].
$\bar{I}$	Corrente elétrica aplicada na bobina do alto-falante [A].
$\beta$	Valor do campo magnético no <i>gap</i> do alto-falante [T].
$l$	Comprimento do enrolamento do fio da bobina imerso no campo magnético [m].
$\beta l$	Fator de força do alto-falante [Tm].
$B$	Indução magnética [T].
$H$	Intensidade do campo magnético [A/m].
$\mu$	Permeabilidade magnética do material [H/m].
$T_A$	Temperatura inicial da bobina em [°C].
$T_B$	Temperatura final da bobina em [°C].
$\alpha_{25}$	Coefficiente de temperatura do material do condutor a 25°C.
THD	Distorção harmônica total [%].
$F$	Força restauradora não linear [N].
$X$	Deslocamento [mm].
$\eta_0$	Rendimento do transdutor [%].
$L_m$	Nível de pressão sonora (SPL em 1 m com 1 W sobre o valor de $R_e$ ) [dB].
$V_{\text{rms}}$	Tensão elétrica <i>root mean square</i> [V].
$P_{\text{rms}}$	Potência elétrica <i>root mean square</i> [W].
$Z_{\text{nom}}$	Impedância nominal [ $\Omega$ ].
$R_e$	Resistência elétrica da bobina em um sinal DC [ $\Omega$ ].
$C_{\text{mes}}$	Capacitância elétrica [ $\mu$ F].
$L_{\text{ces}}$	Indutância elétrica [mH].
$R_{\text{es}}$	Resistência elétrica devido as perdas mecânicas [ $\Omega$ ].
$F_s$	Frequência de ressonância [Hz].
$M_{\text{ms}}$	Massa mecânica total com a carga de ar e bobina [g].
$M_{\text{md}}$	Massa mecânica sem a carga de ar [g].
$R_{\text{ms}}$	Resistência mecânica das perdas totais do driver [kg/s].
$C_{\text{ms}}$	Complância Mecânica total [mm/N].
$K_{\text{ms}}$	Rigidez mecânica da suspensão [N/mm].
$S(\lambda)$	Fator de deformação Suspensão.
$Q_{\text{tp}}$	Total de fator Q considerando todas as perdas.
$Q_{\text{ms}}$	Fator de qualidade mecânico.

$Q_{es}$	Fator de qualidade elétrico.
$Q_{ts}$	Fator de qualidade total.
$V_{as}$	Volume acústico equivalente [l].
$S_d$	Área efetiva do diafragma [cm <sup>2</sup> ].
$\omega_n$	Frequência natural de vibração viga [rad/seg].
$L$	Comprimento livre da viga [m].
$E$	Módulo de elasticidade do material – Módulo de Young [MPa].
$I$	Momento de inércia da viga [kg.m <sup>2</sup> ].
$m$	Massa por unidade de comprimento [kg/m].
$\beta_n L$	Constantes para os cinco primeiros modos de flexão.
$\nu$	Coefficiente de Poisson .
$\varepsilon_x$	Deformação do corpo de prova na direção de $x$ .
$\varepsilon_y$	Deformação do corpo de prova na direção de $y$ .
$\varepsilon_z$	Deformação do corpo de prova na direção de $z$ .
$F_0$	Frequência central do pico na resposta em freq. para cálculo do fator de perda [Hz].
$F_1$	Frequência inferior (-3 dB) para cálculo do fator de perda [Hz].
$F_2$	Frequência superior (-3 dB) para cálculo do fator de perda [Hz].
$\eta$	Fator de perda do material.
$F_{viga}$	Máxima frequência permitida da viga em ensaio no módulo MPM da Klippel [Hz].
$f_n$	Frequência natural de vibração do corpo de prova [Hz].
$H$	Espessura do corpo de prova [mm].
$\rho$	Densidade do material [kg/m <sup>3</sup> ].
$N_{esp.}$	Número de espiras da bobina do alto-falante.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
<b>1.1 Tema e problema</b> .....	23
<b>1.2 Objetivos</b> .....	24
1.2.1 Objetivo geral .....	24
1.2.2 Objetivos específicos .....	24
<b>1.3 Justificativa</b> .....	25
<b>1.4 Estrutura</b> .....	26
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	28
<b>2.1 Processo de desenvolvimento de produto - PDP</b> .....	28
2.1.1 Desenvolvimento de produto como processo de negócio .....	31
2.1.2 Desenvolvimento de produto como fator de crescimento .....	31
2.1.3 Otimização do desenvolvimento de produto .....	32
2.1.4 Ferramentas do PDP .....	33
2.1.4.1 Ferramentas de simulação e modelagem .....	33
2.1.4.2 Significado e utilização da modelagem e simulação .....	35
2.1.4.3 Prática da modelagem e simulação .....	37
2.1.4.4 Conceitualização .....	38
2.1.4.5 Modelagem Computacional .....	39
2.1.4.6 Solução pelo modelo .....	39
2.1.4.7 Implementação .....	40
2.1.4.8 Verificação e validação .....	40
2.1.4.9 Programas computacionais para simulação .....	41
<b>2.2 Produto alto-falante</b> .....	43
2.2.1 Componentes do alto-falante .....	43
2.2.1.1 Sistema motor: bobina e imã .....	45
2.2.1.2 Diafragma: cone e domo .....	53
2.2.1.3 Centragem: suspensão e aranha .....	58
2.2.2 Parâmetros de avaliação de alto-falantes .....	60
2.2.2.1 Resposta em Frequência .....	61
2.2.2.2 Sensibilidade .....	68
2.2.2.3 Impedância nominal .....	69
2.2.2.4 Potência elétrica .....	71
2.2.2.5 Parâmetros de pequenos sinais .....	72
2.2.3 Caracterização dos materiais .....	78
2.2.3.1 Módulo de Young e fator de perda .....	79
2.2.3.2 Coeficiente de Poisson .....	85
2.2.3.3 Densidade .....	86
2.2.4 Análise através de elementos finitos (FEA) .....	87
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	88
<b>3.1 Critérios da pesquisa</b> .....	89
3.1.1 Natureza da pesquisa .....	89
3.1.2 Objetivo do estudo .....	89
3.1.3 Coleta de dados .....	90
3.1.4 Critério de análise de dados .....	90
<b>3.2 Planejamento da pesquisa</b> .....	90

3.2.1 Ações e tarefas propostas para aplicação .....	90
3.2.2 Construção de modelos computacionais.....	91
<b>4 APLICAÇÃO .....</b>	<b>92</b>
<b>4.1 Caracterização de Materiais .....</b>	<b>92</b>
4.1.1 Criação de banco de dados .....	93
4.1.1.1 Propriedades magnéticas .....	93
4.1.1.2 Propriedades mecânicas .....	96
<b>4.2 Banco de dados para simulações .....</b>	<b>111</b>
4.2.1 Estrutura do banco de dados.....	112
<b>4.3 Intervenção no controle de qualidade .....</b>	<b>116</b>
4.3.1 Garantia de componentes conforme especificação .....	116
<b>4.4 Projeto de alto-falante.....</b>	<b>120</b>
4.4.1 Recursos .....	121
4.4.1.1 Programas computacionais .....	123
4.4.1.2 Tempo de projetos .....	125
<b>4.5 Comparação: protótipos virtuais e reais.....</b>	<b>126</b>
4.5.1 Desenvolvimento através de modelagem computacional .....	127
4.5.2 Redução de tempo de projeto .....	142
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>144</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>155</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao ambiente globalizado e dinâmico em que as empresas atualmente estão inseridas, o Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) corresponde a um fator decisivo para adquirir capacidade competitiva. As empresas estão investindo em novas tecnologias, novos processos e técnicas para se tornarem mais ágeis, flexíveis e para assegurar a qualidade e o menor custo para o projeto de novos produtos (Martin e Carvalho [28]).

O encurtamento no ciclo de vida dos produtos intensificou a competição entre as empresas, fazendo com que as organizações investissem no controle efetivo do tempo de desenvolvimento, produção e custos do produto a fim de serem competitivas (Thomas et al. [39]).

O PDP, segundo Tondolo [49], pode ser considerado um processo crítico na competitividade do produto, exigindo um elevado controle gerencial, uma vez que, nesse momento, são definidos materiais, técnicas, ferramentais e processos que irão compor o produto final.

O processo de desenvolvimento de produto, de modo geral, consiste em um conjunto de atividades por meio das quais se busca converter as necessidades e possibilidades de mercado em especificações que possam ser convertidas em um produto. Assim, o sucesso de uma organização está na sua habilidade em converter rapidamente as especificações em produtos e poder fabricá-los e acompanhá-los no mercado (John e Elsenbach [17]).

Segundo Martin e Carvalho [28], o Processo de Desenvolvimento de Produto tradicional sem o uso de ferramentas virtuais, consiste, de uma forma macro, nos seguintes ciclos: projeto, construção de protótipos físicos e testes. Dentre os benefícios previstos com a utilização de simulações computacionais, a maior aplicação está na fase de protótipos, pois se espera ser necessário um menor número de interações até que se atinja o objetivo desejado. Desta forma, não é mais necessário aguardar meses para a construção do protótipo, instrumentá-lo, realizar testes e fazer as alterações nos protótipos para representar as melhorias detectadas. Ao invés disto, é possível construir protótipos virtuais em pouco tempo, testar os modelos em várias condições de testes e aperfeiçoar forma, montagem e manufaturabilidade em uma fração do custo do ciclo tradicional de protótipos físicos (Robert e Arbor [41]).

O avanço recente de tecnologias computacionais tornou possível a implementação de novos processos de desenvolvimento e validação do produto, com a introdução de ferramentas virtuais, que podem resultar em fonte de vantagem competitiva para as empresas (Martin e Carvalho [28]).

A atividade de desenvolvimento de produto é responsável por traduzir objetivos, intenções e ideias em algo concreto: o produto, pelo qual os consumidores pagarão. Dessa forma, o desenvolvimento de produto é um dos mais importantes processos responsáveis pela agregação de valor aos negócios. Essa atividade determina cerca de 70% a 90% do custo final dos produtos, além de outros desempenhos relacionados à qualidade, à diversificação e ao tempo de introdução no mercado (Takahashi e Takahashi [48]).

O objetivo da utilização de modelos computacionais é prover ao engenheiro projetista uma ferramenta que lhe permita rapidamente experimentar e avaliar o comportamento de um dado equipamento, em diversas configurações de uso (Hoffmann [21]). Por se tratar de experimentos em um mundo virtual, o processo físico do mundo real deve ser modelado através de equações matemáticas, sendo essa modelagem um dos fatores que torna complexo o conhecimento e a aplicação da ferramenta. Deve-se também, como premissa para utilização, possuir a caracterização das propriedades físicas dos materiais utilizados nos componentes modelados, pois essa é a forma que o simulador irá diferenciar se está trabalhando com uma viga de aço ou uma simples viga de celulose, por exemplo.

Nesse sentido, visando propor novas ferramentas para o PDP na indústria de alto-falantes, foi desenvolvido o presente tema da pesquisa. Embora o estudo foque em uma indústria de alto-falantes, os conceitos podem ser aplicados, também, com pequenos ajustes, para diversas empresas onde o desenvolvimento de produto é algo importante. Outra contribuição relevante são os estudos gerados e apresentados acerca da caracterização mecânica dos materiais utilizados para confecção dos componentes de um alto-falante. Tal caracterização, permite a criação de bibliotecas de dados a serem utilizadas em futuras simulações e contribui para o controle de qualidade no processo de produção dos componentes, uma vez que, se possui um maior número de informações acerca de componentes individuais.

O problema e os cenários presentes nas empresas de PDP são evidentes, e percebe-se que cada vez mais as indústrias precisam buscar ferramentas e maneiras de inovar e agregar valor ao seu produto. A utilização da modelagem computacional é uma ferramenta tradicional, tanto em empresas de grande porte, onde custos para implantação de novas ferramentas e técnicas raramente esbarram na falta de recursos financeiros, quanto em empresas onde o valor final de venda do fruto da produção é alto.

De acordo com Martin e Carvalho [28], na empresa automobilística, o custo do protótipo completo de engenharia é considerado muito alto porque é produzido com dispositivos e

ferramentais específicos para a construção e montagem de um lote reduzido de veículos. Como entendimento da citação de Martin e Carvalho [28], percebe-se que existe um valor agregado muito alto para a confecção destes protótipos e que, claramente, reduzir este número, gera redução de custos. Uma das ferramentas encontradas para a realização desta redução de custo é justamente a modelagem computacional e a obtenção de resultados sem a necessidade de vários experimentos e montagens de protótipos. Como pode ser visto no trabalho de Kim e Fujimoto [7], a evolução dos sistemas computacionais, mais especificamente na década de 1980, quando as indústrias automobilísticas fizeram grandes investimentos na área de simulação *Computer Aided Engineering* (CAE), tornou possível a perspectiva de realização de testes de desenvolvimento e validação sem a necessidade de protótipos físicos.

Seguindo a linha da colocação anterior, empresas desenvolvedoras de satélites, fabricantes de aviões, navios e montadoras de automóveis tendem a utilizar incansavelmente ferramentas de simulação, visando diversos objetivos citados e gerando uma série de benefícios com o uso de tal recurso, como: redução de tempo de projeto, diminuição de interações em experimentos, uso racional dos competentes corretos que resultam em uma resposta desejada, possível redução nos gastos com ferramental para elaboração de protótipo, menor tempo de mão de obra e recursos para execução de testes de vários experimentos, entre outros. Dessa forma, o estudo objetivou verificar a viabilidade de utilização de tais recursos computacionais em uma indústria de alto-falantes, onde os valores envolvidos estão em outra ordem de grandeza.

## **1.1 Tema e problema**

O Tema que pauta a presente pesquisa está centrado na área de desenvolvimento de produto, tendo como delimitação a construção de modelos computacionais, através do uso do método de elementos finitos como ferramenta de desenvolvimento de produto em uma indústria de alto-falantes.

As organizações, considerando a competitividade, precisam ser capazes de minimizar as ameaças de seus concorrentes, buscando novas estratégias para atingir tal feito. Muitas vezes, para vencer a rivalidade apresentada por empresas do mesmo segmento, manter presença no mercado e estar sempre à frente com produtos inovadores, se faz necessário buscar alternativas diferenciadas para o desenvolvimento de seus produtos. A busca por inovação, também faz uso de novas ferramentas para a concepção do produto. Obviamente, a atenção se dá em ferramentas consagradas no ramo de desenvolvimento, como, por exemplo, a simulação computacional na

fabricação de aeronaves ou veículos automotores.

Entretanto, a importância do estudo baseia-se na verificação de viabilidade de utilização de simulação computacional como ferramenta na indústria de alto-falante, onde o valor final do produto é muito menor quando comparado às indústrias automotiva e de aviação, por exemplo. Embora sejam evidentes os resultados que se consegue obter com tal ferramenta, é necessário analisar a viabilidade de sua utilização, uma vez que o custo para implantação de *software*, com caracterização dos materiais, validação dos resultados, é relativamente alto.

O objetivo final deste estudo não é o de afirmar quais as soluções definitivas a serem aplicadas ou os rumos certos para as indústrias de alto-falantes seguirem durante a etapa de desenvolvimento de produto, mas, propor a utilização de uma ferramenta utilizada em segmentos da indústria, onde o produto final possui alto valor. Portanto, pretende-se com esse estudo responder à seguinte questão: é economicamente viável investir e utilizar simulação computacional através de modelagem com elementos finitos como ferramenta de desenvolvimento na indústria de alto-falantes?

## 1.2 Objetivos

Os objetivos do estudo estão divididos em dois grupos: objetivo geral e objetivos específicos. Tais grupos e suas respectivas descrições estão apresentados na sequência.

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade da utilização de modelagem computacional, através do uso do método de elementos finitos como ferramenta de desenvolvimento de produto na indústria de alto-falantes.

### 1.2.2 Objetivos específicos

a) Implementar técnica de caracterização de propriedade físicas e mecânicas (módulo de Young, amortecimento estrutural, densidade, coeficiente de Poisson) dos materiais utilizados para confecção dos componentes do alto-falante.

b) Criar um banco de dados de propriedades dos materiais comumente utilizados na indústria brasileira de alto-falantes.

c) Realizar a avaliação mecânica de modelos típicos, através do método de elementos



finitos.

d) Realizar a avaliação acústica de modelos típicos através do método do elemento finito.

e) Comparar as respostas obtidas com os modelos analítico e numérico com resultados experimentais, a fim de validar os modelos.

f) Analisar a possibilidade de controle de qualidade de componentes na linha de produção, através da caracterização dos materiais e do uso do modelo numérico para avaliar a sensibilidade do produto aos diferentes componentes.

g) Quantificar o número de protótipos e interações desenvolvidos durante a fase de prototipagem e avaliar o tempo necessário para a análise de falhas, comparando estes com o método de projeto atualmente utilizado.

### 1.3 Justificativa

Atualmente as empresas de desenvolvimento de produto vêm sendo influenciadas pela globalização e, desta forma, sujeitas cada vez mais ao acirramento da concorrência e, inevitavelmente, fazendo com que procurem novas formas de serem competitivas e mostrarem força na disputa pelo mercado.

Portanto, a incansável procura por diferenciais, tanto em processo, produto ou, até mesmo, na fase de concepção, onde tempos de desenvolvimento estão relacionados ao tempo de vida no mercado, fazem parte dos artifícios utilizados pelas indústrias para agregar valor a seus produtos e tornar tais medidas perceptíveis ao usuário final.

Essas mudanças ocasionaram reflexos, tanto no processo de desenvolvimento de produtos como na gestão de custos, visto que as organizações necessitaram buscar a redução de custos desde a fase embrionária do produto, afetando diretamente o processo como um todo (Machado e Souza [27]).

Desta forma, a etapa que se encontra a teoria a respeito do tema é bastante ampla, embora estudos focados para aplicação em indústrias de alto-falantes, onde o valor do produto final é pequeno, surgem dúvidas acerca da viabilidade do uso da ferramenta computacional. Vista dessa forma, conclui-se que, a pesquisa possui aplicação para casos em particular, onde justamente os altos valores envolvidos com aquisição da ferramenta computacional, capacitações e baixo custo do objeto final da produção, criam a expectativa de *payback* muito longo, o que logo tornaria inviável a aplicação.

Cabe salientar que esta pesquisa se justifica por sua importância teórica e aplicada, o

que poderá enriquecer a literatura acadêmica sobre o tema proposto, além de incitar futuros estudos. A técnica apresentada para caracterizar as propriedades dos materiais, necessária para realização de simulação, trás consigo diversas possibilidades de aplicação, sendo assim novas contribuições para o PDP.

#### 1.4 Estrutura

Este projeto foi estruturado em cinco capítulos sendo sua organização conforme os padrões para pesquisas científicas, estabelecidas nas recomendações de Prodanov e Freitas [37]. O primeiro capítulo trás a introdução, procurando apresentar o assunto e a oportunidade para a utilização da ferramenta computacional. Ainda nesse capítulo é possível encontrar o tema da pesquisa, os objetivos, a justificativa, a importância do trabalho e o problema de pesquisa.

No Capítulo 2 encontra-se a Fundamentação Teórica, em que se apresenta uma revisão bibliográfica de alguns conceitos aplicados no estudo. Nesse capítulo estão as características principais do produto alto-falante como transdutor, bem como um modelo analítico para a previsão de seu comportamento físico, baseado nas analogias com circuitos elétricos. Apresenta, também, as premissas básicas dos *softwares* de simulação que trabalham com elementos finitos. No mesmo capítulo, é realizada uma revisão sobre os tipos de materiais utilizados na confecção do alto-falante e uma breve descrição das principais propriedades mecânicas. No final, são apresentadas as etapas encontradas no desenvolvimento do alto-falante, exemplificando e abordando com maior ênfase a fase de protótipos, onde se visualizam os maiores ganhos com a utilização do uso da ferramenta computacional. Portanto, a fundamentação teórica é essencial para a compreensão e a aplicabilidade do tema, pois todos os tópicos estudados são necessários para o bom desenvolvimento da pesquisa.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa. Nesse item, estão descritas as etapas de implementação deste trabalho. Descreve-se, também, o delineamento da pesquisa, abordagens, método de pesquisa, e delimitação do tema.

No Capítulo 4 encontra-se a Aplicação. Nessa etapa do estudo é apresentada a utilização da ferramenta computacional, as comparações com o método tradicional, bem como são apresentadas, também, as vantagens e desvantagens oriundas da utilização da ferramenta. Apresenta-se, de forma explícita, todas as vantagens e desvantagens encontradas, bem como os resultados de cada técnica proposta.

Finalizando, no último capítulo, a pesquisa é encerrada na conclusão e nas considerações

fnais, onde, de forma simplificada, coloca-se um resumo do estudo e uma resposta final para o questionamento existente nos capítulos iniciais. Essa etapa final contém, também, as sugestões e as indicações para novos trabalhos, a fim de dar continuidade nesse estudo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A Revisão de Literatura está apresentada em dois grupos. A primeira parte aborda o processo de desenvolvimento de novos produtos (DNP) com a descrição de métodos e de ferramentas tradicionais aplicadas na indústria. Por fim, a segunda etapa deste capítulo apresenta o alto-falante (AF), indicando seus componentes, seu processo de fabricação e os principais parâmetros técnicos que devem ser atendidos em novos projetos deste tipo de transdutor. Ainda, na etapa final, são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais tipicamente empregados neste tipo de produto. A determinação das propriedades mecânicas é necessária para suprir o *software* de simulação e permitir a utilização da modelagem computacional.

### 2.1 Processo de desenvolvimento de produto - PDP

O Campo de desenvolvimento de produtos surgiu no final da década de 1960 como uma atividade de pesquisa e desenvolvimento dentro da engenharia focada para o gerenciamento de projeto e inovação. Contudo, foi durante a década de 1980 que o desenvolvimento de produto começou a despertar maior interesse das organizações, devido aos movimentos do mercado, com a voz do consumidor e a orientação pelo usuário. Isso levou as organizações a reverem o processo de desenvolvimento de produtos com outra perspectiva. Assim, no início dos anos 1990, duas novas situações se configuravam dentro das organizações direcionadas pelo produto: uma delas foi a integração operacional e a outra foi o desenvolvimento estratégico do produto (Cooper [8]).

Conforme Nambisan [30], a integração operacional foi o início de um alinhamento entre os processos operacionais. Como o produto percorre toda a organização, os processos de desenvolvimento passaram a receber maior atenção para melhorar sua performance e rendimento (teoria estruturalista). O desenvolvimento estratégico do produto começou a ser tratado com mais ênfase na medida em que a globalização foi tomando proporções maiores e provocando um nível de competição mais intenso (teoria estrategista).

Um projeto é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo. A sua natureza temporária indica um início e um término definidos. Cada projeto cria um produto, serviço ou resultado exclusivo. Um produto pode ser um item final ou um item componente de outro item (PMBOK [35]). O término é alcançado quando os objetivos tiverem sido atingidos ou quando se concluir que estes objetivos não serão ou não poderão ser

atingidos e o projeto for encerrado (PMBOK [35]).

Outro fator importante é o uso da tecnologia com a qual a empresa opera e que pode sustentar o desenvolvimento de produtos. As tecnologias não somente podem gerar diferenciação, mas, mais importante que isto, permitem o gerenciamento do processo e suas relações. Em especial, o último aspecto torna possível determinar o grau de complexidade dos desenvolvimentos na organização (Volberda [51]).

No entanto, o PDP, ao converter as especificações em produtos e, posteriormente, fabricá-los, deve estar associado às estratégias da organização, uma vez que a atividade de desenvolvimento de produto influencia e é influenciada pelo trabalho de, praticamente, todas as pessoas que a compõe. Isto é facilmente percebido, visto que o produto deve ser desenvolvido, fabricado, vendido e controlado por diversos setores da organização.

O desenvolvimento de novos produtos vem sendo considerado como um meio importante para a criação e a sustentação da competitividade. Para muitas indústrias, a realização de esforços nessa área é um fator estratégico e necessário para continuar atuando no mercado. A implementação de novos produtos sustenta uma esperança de aumentar a participação de mercado e melhorar a rentabilidade de uma empresa (Kotler [24]).

Entende-se como desenvolvimento de novos produtos (DNP) toda ação ou processo total de estratégia, geração de conceito, avaliação do plano de produto e de marketing e comercialização destinado à implementação de uma nova oferta (Crawford e Benedetto [9]). Dentro da definição de novos produtos, Crawford e Benedetto [9] apresentaram cinco grupos. As categorias de novos produtos podem ser classificadas da seguinte forma:

- Produtos novos para o mundo: produtos que são invenções.
- Entrada em novas categorias: envolve produtos que levam uma firma a entrar em uma nova categoria para si, mas não novos para o mundo.
- Adições na linha de produtos: constituem produtos que são extensões de linha, complementam os produtos atuais da empresa.
- Melhoria de produtos: são produtos correntes da empresa feitos de uma melhor forma ou aperfeiçoados.
- Reposicionamento: caracteriza-se por produtos dirigidos para um novo uso ou aplicação.

Através da classificação de Crawford e Benedetto [9] verificou-se que o conceito de novos produtos representa, fundamentalmente, uma nova oferta para a comercialização de uma

empresa.

A velocidade no desenvolvimento de um novo produto, segundo Prahalad e Hamel [36], “é um componente muito importante da capacidade de passar à frente da concorrência. [...] O maior inimigo das organizações é a inércia, complacência e miopia. [...] O verdadeiro problema da competitividade é que muitas empresas não conseguem prever, nem tampouco inventar as novas regras da competição em seu setor”.

“Experiências mostram que nenhuma outra atividade parece levar mais tempo, mais dinheiro, envolve mais armadilhas ou mais angústias que um programa de Novos Produtos” (Norman e Yuspeh [13]). Segundo Toni e Mattia [12] implementar um novo produto é, dependendo da sua complexidade, uma tarefa que envolve altos riscos. Uma implementação mal feita, com um produto que não foi aceito pelo mercado por vários motivos, pode causar danos às vezes irreversíveis à empresa, tais como deterioração da sua imagem, baixo retorno sobre o capital investido, ciclo de vida declinante, prejuízos financeiros e outros.

Conforme Lambin [25] foi identificado que há alguns fatores que mais contribuem para o êxito de um novo produto. Os fatores identificados estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fatores que contribuem para o êxito de um novo produto.

Fator	Contribuição
1. Adaptação do produto às necessidades do mercado	85%
2. Adequação do produto às forças distintas da empresa	62%
3. Superioridade tecnológica do produto	52%
4. Apoio da direção geral	45%
5. Utilização de um processo de avaliação dos novos produtos	33%
6. Ambiente competitivo favorável	31%
7. Estrutura organizacional adaptada	15%

Fonte: (Lambin [25], 2000)

Na aplicação da Tabela 2.1, no cenário do estudo, pode-se dizer que os seguintes fatores se aplicam ao desenvolvimento de alto-falantes ao se utilizar simulações computacionais: superioridade tecnológica e adaptação do produto às necessidades do mercado. Como exemplo, modelagem computacional dos transdutores, é possível a implementação e a verificação de resultados em um menor intervalo de tempo. Desta forma, consegue-se encontrar a necessidade que demanda do mercado mais rapidamente.

### 2.1.1 Desenvolvimento de produto como processo de negócio

A reengenharia, processo no qual as estruturas organizacionais foram modificadas a fim de melhorar a competitividade, originou a abordagem de processos dentro das empresas (Rozenfeld [40]).

O mapeamento (modelagem) de todos os processos de uma empresa, a identificação dos *business processes* (BP), é essencial para que toda a empresa possua a mesma visão, ou seja, se obtenha uma visão holística. Visão holística significa ter-se uma “imagem única” de uma empresa. Pois não se perde o foco da abrangência desta visão em relação às demais (Rozenfeld [40]).

Os processos de negócios podem ser organizacionais ou gerenciais. Os processos organizacionais são os processos de trabalho, os processos comportamentais e os processos de mudanças. Os processos gerenciais são os processos de direcionamento, os processos de negociação e os processos de monitoramento e controle. Segundo esta classificação, o PDP é um processo organizacional, mais especificamente, um processo de trabalho (Mundim [29]).

### 2.1.2 Desenvolvimento de produto como fator de crescimento

A relação de valores entre a empresa e seus clientes ocorre através do fornecimento de produtos em troca de remuneração. Esta remuneração paga os custos operacionais (custos diretos e indiretos) e, adicionalmente, a parcela correspondente ao lucro, (Figura 2.1). Enquanto a empresa possui produtos de interesse para os clientes este fluxo de rendimentos se mantém (Patterson e Fenoglio [33]).

No entanto, se parte do faturamento não for investido em novos produtos a fim de renovar este fluxo de rendimentos, haverá um declínio até o ponto de não haver mais vendas (Patterson e Fenoglio [33]). Empresas que dispõem pouca atenção à renovação, em relação à concorrência e aos avanços tecnológicos, irão desaparecer do mercado (Andreasen e Hein [1]).

Para evitar este declínio, parte dos rendimentos deve ser investido em processos de negócios críticos, que são responsáveis pela criação e lançamento de novos produtos (Patterson e Fenoglio [33]). Desta forma, deve-se assumir uma postura ativa, contando com a ajuda do desenvolvimento de novos produtos, que é uma fonte de energia que influencia, substancialmente, na capacidade da empresa em renovar-se (Andreasen e Hein [1]).

Ainda segundo Patterson e Fenoglio [33] o aumento de faturamento, oriundo do esforço

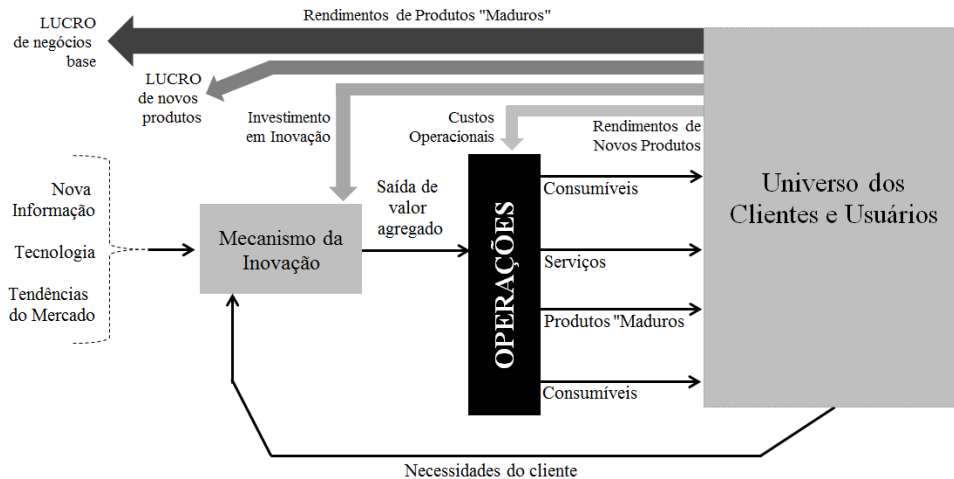


Figura 2.1 – O mecanismo da inovação.  
 Fonte: (Patterson e Fenoglio [33], 1999)

em desenvolvimento de novos produtos, depende das oportunidades e da capacidade da empresa em criar novos produtos e serviços. Os quatro fatores fundamentais que conduzem a um aumento do faturamento são (1) a eficácia das operações de vendas e distribuição; (2) a qualidade dos processos relacionados a novos produtos; (3) a liderança efetiva da alta direção da empresa; e, (4) a criatividade e a produtividade dos empregados que trabalham em novos produtos.

### 2.1.3 Otimização do desenvolvimento de produto

A globalização dos mercados teve como um dos efeitos principais a fragmentação dos mesmos em um número maior de nichos. Isto torna o desenvolvimento de produtos um dos principais processos para atingir significativa diferenciação (Schilling e Hill [43]). Segundo estes autores, um PDP de sucesso requer atenção para quatro pontos estratégicos: (1) a estratégia tecnológica, ou o processo pelo qual a empresa constrói o seu portfólio de desenvolvimento de produtos; (2) o contexto organizacional no qual está inserido o PDP; (3) a formação e uso de times de projeto; e, (4) o uso de ferramentas que aperfeiçoam o PDP (Bolgenhagen [4]).

O uso de times multifuncionais aumenta a possibilidade de sucesso dos projetos. Estes devem incluir membros das diversas áreas da empresa e podem envolver clientes e fornecedores no processo. As ferramentas mais importantes são os processos de *Stage-Gates* (SG), *Quality Function Deployment* (QFD), *Design for Manufacture* (DFM), *Design for Assembly* (DFA) e o uso de CAD (Bolgenhagen [4]).



#### 2.1.4 Ferramentas do PDP

A utilização de um processo planejado no DNP constitui uma importante ferramenta gerencial capaz de melhor sustentar as decisões de implementação e gestão de produto, diminuindo seus riscos e aproveitando melhor as oportunidades de mercado .

A gestão do conhecimento é formada por princípios e práticas. Os princípios são valores e crenças que irão nortear e fomentar as práticas. As práticas da gestão do conhecimento são as ações e alguns elementos complementares, como infraestrutura, que irão gerir e disseminar o conhecimento numa organização (Ferrari et al. [18]).

As ferramentas do PDP podem ser consideradas importantes elementos da gestão deste processo [18], pois são os veículos para a incorporação do conhecimento, para a alavancagem do aprendizado e para a transferência do conhecimento em toda a organização.

Classifica-se as ferramentas de suporte ao PDP em três categorias, sendo a primeira a das ferramentas de pesquisa de mercado, tais como testes de conceito, *focus group* , voz do cliente e pré-testes de mercado. A segunda categoria é a das ferramentas de projeto de engenharia, dentre as quais estão prototipagem rápida, engenharia simultânea, DFMA, CAD/CAE e FMEA. E por último, a terceira categoria é a das ferramentas de desenvolvimento organizacional, representadas pelos gerentes, equipes auto gerenciáveis, organização matricial, QFD, entre outras.

Algumas das ferramentas podem ser classificadas, mais especificamente, como conceitos e metodologias e já foram apresentadas no tópico anterior. Neste tópico serão abordadas, de forma sucinta, algumas das ferramentas e técnicas (propriamente ditas) consideradas as de maior utilidade para a empresa em estudo.

##### 2.1.4.1 Ferramentas de simulação e modelagem

Nas décadas de 1960 e 1970 a modelagem computacional era excessivamente cara e utilizava ferramentas que, geralmente, só eram disponíveis em grandes corporações. A mão de obra precisava ser especializada, pois a construção e execução de modelos dependiam de conhecimentos muito acima da média observada em usuários comuns. O grupo que trabalhava em modelagem computacional geralmente era composto por doutores, trabalhando em universidades, centros de pesquisa e no meio militar, que desenvolviam sistemas complexos utilizando as linguagens de programação disponíveis na época, tais como o Fortran. Os tempos de execução

dos cálculos eram longos, pois, naquela época, os computadores eram menos poderosos que os atuais computadores (Turrioni e Mello [50]).

A partir do início da década de 1980, os computadores foram se tornando mais rápidos e baratos. Nesta época, por exemplo, as linhas de montagens de carros passaram a utilizar a modelagem computacional para resolver problemas tais como de segurança e otimização da linha. Nesta mesma época, a ferramenta começou a ser utilizada em negócios e por estudantes e pesquisadores que descobriram seu potencial. A modelagem computacional se tornou difundida nos setores de engenharia e negócios. Embora o aprendizado e a correção de erros ainda fossem longos (Turrioni e Mello [50]).

No final da década de 1980, o valor da modelagem computacional foi reconhecido por muitas organizações, tanto que, várias delas fizeram desta um requisito para que investimentos grandes pudessem ser aprovados. No entanto, organizações pequenas raramente utilizavam essa técnica. Os computadores pessoais permitiram o surgimento de várias ferramentas acessíveis a qualquer profissional (Turrioni e Mello [50]).

Nos anos de 1990, a modelagem computacional atingiu um grau de maturidade suficiente para que fosse adotada por organizações de variadas áreas e portes. Passou a ser utilizada em diversas situações, tais como, estágios iniciais de projetos, em animações e pesquisa. Este avanço foi possível, principalmente, pelo surgimento de ferramentas de modelagem fáceis de usar, e pela disponibilidade de computadores mais rápidos e baratos. Com os atuais *softwares* de quarta geração, o tempo e o esforço despendidos num projeto de modelagem se concentra mais na atividade de análise dos resultados e menos na programação e *debugging*.

Conforme Turrioni e Mello [50], há cinco gerações de *softwares* de simulação, e essas são:

- G-0 - Linguagem de programação de propósito geral e aplicáveis em qualquer contexto, porém, exige conhecimento profundo na linguagem, muito tempo de desenvolvimento e não são reutilizáveis. Como exemplo de *softwares*: Fortran, Pascal e C.

- G-1 - Linguagens de simulação e comandos projetados para tratar lógica de filas e demais fenômenos comuns. Mais amigáveis que o G-0, porém ainda requerem programador especializado. Exemplos: Simscript, GPSS, Siman e Slam.

- G-2 - Simuladores ou pacotes de simulação projetados para permitir modelagem rápida. Dispõem de elementos específicos para representar filas e transportadores. Restringem, porém, o uso para sistemas de certos tipos e não complexos. Exemplos: Simfactory e Xcell.

- G-3 - Simuladores integrados com linguagens, em um só pacote integram a flexibilidade das linguagens de simulação (G-1), com a facilidade de uso dos pacotes de simulação (G-2). Exemplos: Witness e ProModelPC.

- G-4 - Simuladores integrados com linguagens no ambiente Windows. Houve aprimoramento da G-3, que permite modelagem rápida, inclusive para sistemas complexos sem restrições de áreas de aplicação (ou *templates*). Exemplos: ProModel for Windows.

A ênfase agora deve ser dada à sistemática de análise, o que inclusive viabiliza muito a utilização prática de simulação nas indústrias.

#### 2.1.4.2 Significado e utilização da modelagem e simulação

Conforme Chung [6] a modelagem e simulação é o processo de criar e experimentar um sistema físico através de um modelo matemático computadorizado. Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou processos que interagem e recebem entradas e oferecem resultados para algum propósito.

Para Turrioni e Mello [50], o propósito de se conduzir uma pesquisa através da modelagem e da simulação de sistemas é:

- Conhecer mais a fundo a forma de operação do sistema;
- Desenvolver políticas operacionais e recursos para aperfeiçoar o desempenho do sistema;
- Testar novos conceitos e/ou sistemas antes de implementá-los.

Para Pereira [34] a simulação computacional é a representação de um sistema real através de um modelo utilizando um computador, trazendo a vantagem de tornar possível visualizar esse sistema, implementar mudanças e responder a testes do tipo o que aconteceria se (*what-if*), minimizando custos e tempo. Desse modo, o objetivo da simulação é estudar o comportamento de um sistema, sem que seja necessário modificá-lo ou mesmo construí-lo fisicamente.

Interpretando Seila [44], um sistema é um conjunto de componentes ou entidades interativos. Esses sistemas podem ser discretos ou contínuos, ou uma combinação de ambos. Em um sistema discreto a variável independente não pode assumir infinitos valores, mas sim, apenas valores inteiros (1, -1, 3, -5), por exemplo.

No caso das amostras em um computador, o tempo contínuo é transformado em tempo discreto: amostras que representam a evolução de uma variável independente contínua, nesse caso, o tempo. Nestas situações, as linguagens de simulação devem estar em condições de

resolver sistemas de equações diferenciais (Pereira [34]).

Um modelo é a representação abstrata e simplificada do sistema (Seila [44]). Modelos determinísticos são aqueles cujas equações que os descrevem são equações determinísticas. Um exemplo disso é a gravitação newtoniana e a relatividade. Nesse caso, se você perturba o modelo sempre com o mesmo tipo de entrada ele sempre responderá da mesma forma.

Um modelo estocástico (ou probabilístico) não é previsto por equações determinísticas, mas sim, por funções densidade de probabilidade. Esse é o caso da física quântica, por exemplo. E, nesse caso, o melhor que se pode fazer é prever a probabilidade de encontrar a saída em um determinado estado (a partir de uma dada perturbação). Os resultados gerados pelos modelos estocásticos são diferentes a cada replicação, em razão da natureza aleatória do modelo (Pereira [34]).

A simulação terminante é aquela em que se está interessado em estudar o comportamento do sistema num dado intervalo de tempo de simulação. Quando se está interessado em estudar o sistema a partir do momento em que o mesmo atingir um estado estacionário, a simulação é dita não terminante (Pereira [34]).

A simulação é bastante adequada quando (Harrel et al. [19]):

- o sistema possuir comportamento estocástico (ou estiver sujeito à variáveis aleatórias);
- houver complexidade na dinâmica do processo;
- deseja-se observar o comportamento do sistema por um determinado período;
- o uso da animação for importante para visualizar o processo e resposta do sistema.

Destaca-se as seguintes vantagens para o uso da simulação (Chung [6]):

- a experimentação pode ocorrer em um curto período de tempo, em virtude do apoio computacional;
- menor necessidade de análise, uma vez que os pacotes de *softwares* disponíveis no mercado facilitam a análise dos dados;
- facilidade da demonstração dos modelos, em virtude da alta capacidade gráfica dos pacotes de softwares disponíveis no mercado para a simulação.

No entanto, o uso de simulação tem as seguintes desvantagens (Robinson [38]):

- custo elevado, uma vez que os *softwares* tem um alto custo de aquisição. Além disso, se for necessária a contratação de consultores para a construção do modelo, o custo pode ser ainda mais alto;
- consome muito tempo e os benefícios podem não ser imediatos;

- a maioria dos modelos para simulação requerem uma quantidade significativa de dados;
- requer habilidade dos analistas/pesquisadores, pois os *softwares* não analisam os dados por si só. Entre as habilidades necessárias pode-se citar a modelagem conceitual, validação e estatística;
- confiança exagerada no modelo deve ser evitada. Consideração deve ser dada para a validade do modelo e para as simplificações realizadas no mesmo.

Em complemento ao fator custo empregado para aquisição de ferramenta, Sargent [42] apresentou um comparativo relacionando o aumento do custo conforme a precisão do modelo é que simulado. O confronto entre valor e confiança/precisão é apresentado na Figura 2.2 .

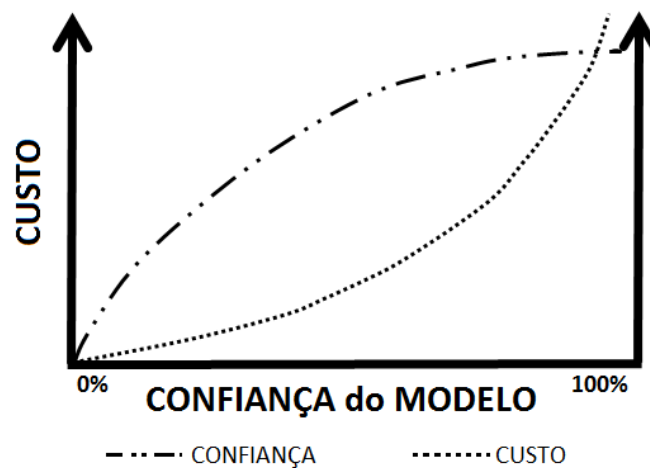


Figura 2.2 – Custo X confiabilidade da simulação.  
Fonte: (Sargent [42], 2007)

Portanto, fica fácil entender que um modelo com precisão elevada, possui um alto valor agregado. Este alto valor apresentado na situação onde a confiança também é alta, se dá devido à aquisição e ao treinamento para uso do *software* ou ferramenta CAE escolhida.

#### 2.1.4.3 Prática da modelagem e simulação

Conforme Bertrand e Fransoo [3] a metodologia de pesquisa na modelagem quantitativa da gestão de operações tradicionalmente não é percebida como um assunto. A mais antiga contribuição para a discussão sobre metodologia em simulação foi apresentada em 1974, cujo modelo é apresentado na Figura 2.3.

Neste modelo, a abordagem operacional de pesquisa consiste de quatro fases: conceitualização, modelagem, solução pelo modelo e implementação. Na fase de conceitualização,

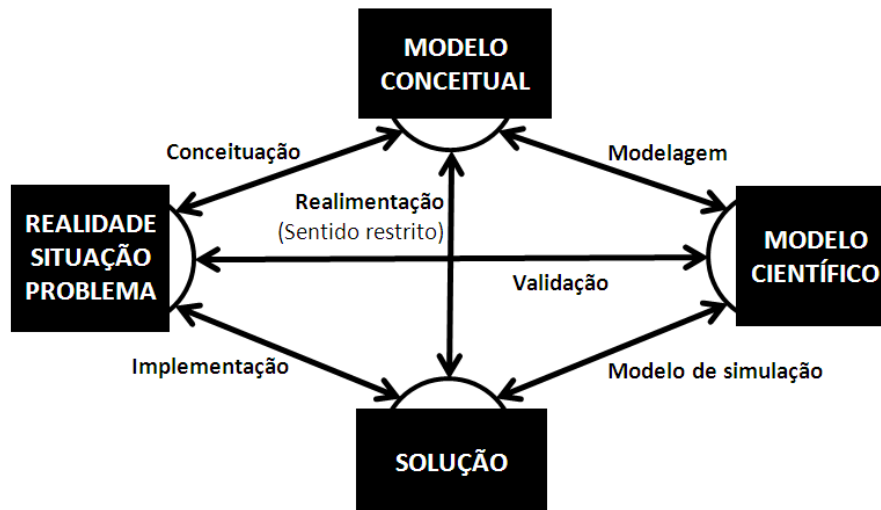


Figura 2.3 – Modelo de pesquisa para simulação.  
 Fonte: (Bertrand e Fransoo [3], 2002)

o pesquisador cria o modelo conceitual do problema e do sistema sob estudo, toma decisões sobre as variáveis que necessitam ser incluídas no modelo e sobre o escopo do problema e do modelo a serem estudados. Na fase de modelagem, o pesquisador realmente constrói o modelo quantitativo, definindo as relações causais entre as variáveis. Na fase de solução pelo modelo, em geral, a matemática desempenha um papel determinante. Finalmente, na fase de implementação, os resultados do modelo são implementados e um novo ciclo pode começar (Turrioni e Mello [50]).

#### 2.1.4.4 Conceitualização

Segundo Robinson [38], a motivação para um estudo de simulação é o reconhecimento de que existe um problema no mundo real. O problema deve abranger um sistema existente ou um entendimento sobre um sistema proposto.

Para Seila [44] uma declaração clara e concisa do problema de decisão ou a razão para se desenvolver o modelo de simulação é a primeira ação desta fase. O pesquisador deveria saber os tipos de decisões a serem antecipadas e qual o sistema envolvido. Segundo Robinson [38], em muitos casos, o próprio cliente tem condições de explicar e descrever as operações do sistema do mundo real, que é o coração da situação problema, para a definição do modelo conceitual.

O modelo conceitual, segundo Robinson [38], é uma descrição específica do modelo de simulação, não se importando com o software, descrevendo os objetivos, entradas, saídas, conteúdo, suposições e simplificações do modelo.

Outro ponto importante nesta fase é a definição dos objetivos da simulação. Para Robinson [38] ela significa a natureza pela qual o modelo é determinado, o ponto de referência para a validação do modelo, o guia para a experimentação e uma das métricas pela qual o sucesso do estudo é julgado. Os objetivos definem o que se espera atingir com o estudo, o nível de desempenho esperado e as restrições existentes.

#### 2.1.4.5 Modelagem Computacional

Na etapa de modelagem, o modelo conceitual é convertido no modelo computadorizado. O modelo pode ser programado através de uma planilha eletrônica, de um *software* especialista em simulação ou de uma linguagem de programação (Robinson [38]).

A natureza desta etapa irá depender em grande parte do *software* para simulação escolhido para a implementação do modelo. O pesquisador pensa pela primeira vez em como relacionar o modelo conceitual com o modelo computacional. Segundo Robinson [38] este modelo computacional deve ser desenvolvido de forma incremental, documentando-o e testando-o a cada passo, de forma que os erros possam ser identificados previamente, ao contrário do que aconteceria se os testes para verificar a confiabilidade e validade do modelo fossem deixados para depois de que todo o modelo estivesse pronto. A maioria dos softwares disponíveis para simulação permite essa abordagem incremental na construção dos modelos.

#### 2.1.4.6 Solução pelo modelo

Para Robinson [38] uma vez desenvolvido o modelo, são realizadas experimentações, através do modelo simulado, para se obter um melhor entendimento do mundo real ou para encontrar soluções para os problemas do mundo real. Trata-se de um processo de análise *what-if*, ou seja, fazer alterações nas entradas do modelo, rodar o modelo, analisar os resultados, aprender com os resultados, fazer alterações na entrada e assim sucessivamente.

Segundo Seila [44] uma boa idéia é armazenar os dados obtidos ao se rodar o modelo computacional de forma que não se necessite repetir o processo no caso de alguma alteração no procedimento usado para analisar os dados. Uma vez que o modelo começa a rodar e a gerar os resultados, é preciso aplicar os procedimentos de análise estatística dos dados para avaliar o desempenho do sistema.

#### 2.1.4.7 Implementação

De acordo com Robinson [38], afirma-se que a implementação pode ser interpretada de três formas. A primeira, pela implementação das descobertas do estudo de simulação no mundo real; a segunda, na implementação do modelo ao invés de suas descobertas; e, a terceira, ao interpretar a implementação como um aprendizado, que pode ser colocada em prática apenas em uma tomada de decisão futura.

No primeiro caso, ou seja, a implementação das descobertas do estudo de simulação, um relatório final deve ser elaborado descrevendo a situação problema e os objetivos do projeto, um resumo do modelo, os experimentos realizados destacando os resultados obtidos, uma lista das conclusões e recomendações e, finalmente, relatando sugestões para simulações futuras. No processo de implementação são os clientes que determinam quais das recomendações do estudo de simulação serão colocadas em prática no mundo real (Turrioni e Mello [50]).

O segundo caso envolve entregar uma cópia do estudo de simulação desenvolvido ao cliente, de forma que ele possa rodar o modelo no momento em que achar mais oportuno ou que necessitar dos resultados para tomar uma decisão. Neste caso, é necessária a documentação adequada do modelo e o treinamento dos clientes para sua correta utilização (Turrioni e Mello [50]).

No terceiro caso, o pesquisador, o usuário da simulação e os clientes, ganham um maior entendimento do mundo real não apenas a partir dos resultados dos experimentos da simulação, mas, de todo o processo de desenvolvimento e uso do modelo de simulação (Turrioni e Mello [50]).

#### 2.1.4.8 Verificação e validação

A verificação é o processo que assegura que o modelo conceitual foi transformado em um modelo computacional com precisão adequada (Robinson [38]). Acrescentando, Seila [44] completou que trata-se, basicamente, de um processo de *debugging*, mas, que pode ser complicado pelo fato do programa de simulação envolver variáveis aleatórias cujos valores não podem ser prognosticados antecipadamente.

Segundo Duarte [15] verificar o modelo é realizar um trabalho de depuração da programação procurando dois tipos de erros: erros de sintaxe e erros de semântica. As principais técnicas de verificação são: revisar a codificação (programação) do modelo, verificar se a res-



posta de saída do modelo é coerente, verificar se a animação é coerente com a realidade ou com o esperado, usar o recurso de detecção de erros do pacote do software utilizado.

Para Seila [44] a validação é o processo que assegura que o modelo computacional se aproxima adequadamente do comportamento desejado do sistema real. Geralmente a validação envolve coletar dados do sistema real e do sistema simulado, comparando-os e certificando-se de que os resultados não diferem substancialmente. Caso os dados do mundo real difiram dos do modelo é preciso refinar o modelo, o que está de acordo com o processo de realimentação da Figura 2.3.

Conforme Pereira [34], apesar de não haver uma metodologia que garanta a hipótese de que o sistema seja válido para os objetos propostos, algumas propostas ajudam na tomada de decisão e podem reduzir as probabilidades de que se esteja tomando a decisão errada, validando um modelo que vai gerar resultados não confiáveis, ou invalidando um modelo bom, ocasionando perda inútil de tempo.

#### 2.1.4.9 Programas computacionais para simulação

Conforme Turrioni e Mello [50] os *softwares* de simulação foram desenvolvidos para superar as deficiências associadas com a modelagem de sistemas complexos baseados em uma linguagem de propósito geral como Fortran, C, Pascal ou Basic. Algumas das vantagens da utilização de um *software* de simulação são:

- O tempo de programação é significativamente reduzido, pois o *software* provê maior flexibilidade para tarefas como geração de números aleatórios a partir de uma distribuição de probabilidade, avançar o tempo de simulação, determinar o próximo evento, coletar e analisar dados, informar os resultados e adicionar ou apagar registros;
- Os blocos de construção básicos no *software* de simulação representam a simulação do sistema real em um formato melhor. O *layout* dos blocos representa o fluxo de entidades em uma forma clara. O código de programação em uma linguagem como o FORTRAN é mais difícil de entender;
- Os modelos de simulação são, geralmente, mais fáceis de alterar quando escritos em uma linguagem de simulação porque envolve alterar um código em um bloco particular, que pode ser facilmente descoberto por meio de ferramentas de verificação e depuração. Uma linguagem de programação necessita que mudanças sejam feitas em um grande número de linhas, dificultando sua detecção;

- A descoberta de um erro é mais fácil, uma vez que um menor número de linhas de código têm que ser escritas.

A crescente popularidade de uso da simulação como ferramenta de modelagem e análise de problemas resultou em uma vasta e, também, crescente disponibilidade de *softwares* de simulação no mercado. Como estes softwares normalmente representam dispêndios consideráveis para as empresas que adquirem uma licença de uso, sua seleção adequada passa a ser um dos fatores chave no sucesso dos projetos de simulação a serem futuramente desenvolvidos. Assim sendo, esta seleção deverá ser feita cada vez mais com base em critérios objetivos, levando em conta não apenas as características dos produtos, mas também, das aplicações que se pretende desenvolver (Turrioni e Mello [50]).

Segundo Nikoukaran [32] alguns dos critérios que devem ser levados em consideração na seleção de um *software* para simulação são:

- Credibilidade do vendedor ou do fabricante do *software*, documentação (manuais) disponível e suporte ao usuário;
- Presença de facilidades que auxiliem o pesquisador no desenvolvimento do modelo e na entrada interativa de dados;
- Possibilidade de rodar a simulação várias vezes e alterar o gerador de números aleatórios, quando necessário;
- Qualidade da animação do pacote de *software*;
- Presença de ferramentas para facilitar o *debugging*, a verificação e a validação dos modelos simulados;
- Qualidade dos resultados (relatórios, gravação em mídias ou em outros arquivos, tais como um editor de textos);
- Capacidade do software de rodar em diversas estações (PCs, *workstations*) e sistemas operacionais.

Algumas características marcantes são comuns à maioria dos produtos que disputam este mercado. Dentre elas, destaca-se a busca de um ambiente de trabalho que seja o mais amigável possível, de preferência um aplicativo Windows, com facilidades para a modelagem, depuração, visualização da execução, análise estatística de resultados e geração de relatórios. Mas, uma das características de maior apelo comercial refere-se aos recursos de animação. Estes, vão desde simples implementações com símbolos gráficos (círculos, quadrados, entre outras formas) piscando na tela e mostrando valores numéricos que descrevem o estado do sistema (tamanho

de filas, por exemplo), até sofisticados recursos de animação 3D que, obviamente, demandam elevado esforço computacional e encarecem o produto (Turrioni e Mello [50]).

## 2.2 Produto alto-falante

O fundamento de funcionamento do alto-falante atual começou a ser desenvolvido em 1874, quando Ernst W. Siemens descreveu o primeiro transdutor dinâmico ou de bobina móvel, o qual possuía uma bobina circular de fio condutor imerso em um campo magnético permanente, fixada de tal maneira que pudesse se mover na direção normal à direção do fluxo magnético. Contudo, inicialmente, Siemens não usou seu dispositivo para a transmissão audível. O mesmo Siemens, em 1877, desenvolveu, da mesma forma que o radiador sonoro de um transdutor de bobina móvel, um diafragma não magnético. O diafragma tinha a forma de um cone de extremidades exponencialmente alargadas como uma trombeta. Surgiu assim, o alto-falante corneta que fora utilizado na maioria dos fonógrafos mecânicos nessa era acústica (Bortoni [5]).

### 2.2.1 Componentes do alto-falante

Conforme Dickason [14] os transdutores eletrodinâmicos de graves, médios e agudos encontram-se na grande maioria em caixas acústicas e estão baseados no mesmo conceito: um campo magnético permanente, onde a variação está no sinal de áudio na bobina. É a combinação de um sinal de áudio variável com um campo magnético permanente que gera uma força mecânica na bobina na direção axial e move, dessa forma, o cone. A relação entre força, campo magnético e corrente elétrica na bobina é conhecida conforme a Regra de Fleming, e conhecida, também, como Regra da Mão Esquerda.

De maneira simplificada, pode se afirmar que quando aplicada uma corrente alternada à bobina móvel, e esta imersa em um campo magnético permanente e perpendicular à mesma, a bobina sofrerá a ação de uma força perpendicular ao campo, conforme Lei de Faraday. Esta força mecânica resultante, obriga o diafragma ou cone (ligados mecanicamente à bobina) a se deslocar em um movimento perpendicular ao campo magnético no entreferro, movimentando o ar em ambas as faces do cone e provocando a radiação de uma onda sonora análoga ao sinal de áudio produzido na bobina. A Figura 2.4 apresenta o esquema técnico de um transdutor destinado para reprodução de médias e baixas frequências, também conhecido como *woofer*.

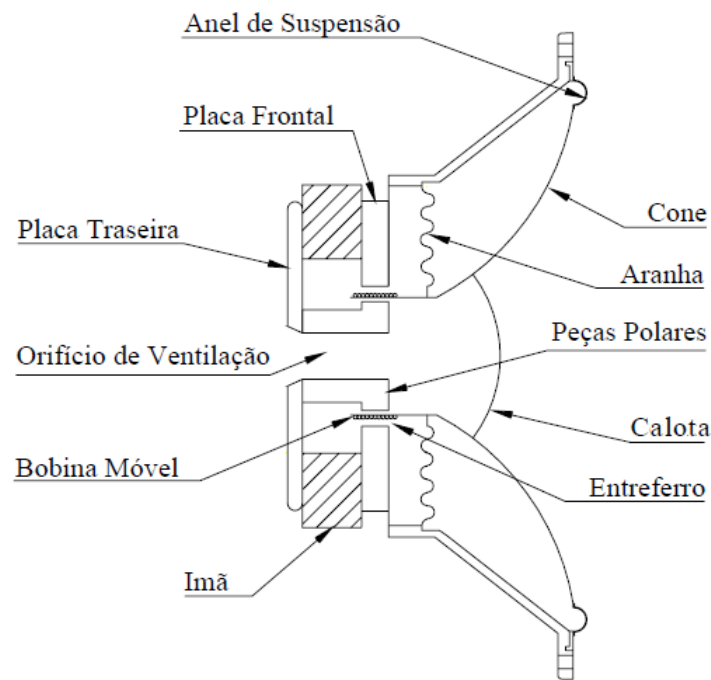


Figura 2.4 – Diagrama tradicional de um alto-falante do tipo *woofer*.  
Fonte: (Bortoni [5], 2005)

Tendo em vista a forma de funcionamento do alto-falante, é inevitável pensar em uma analogia com os motores elétricos, que também convertem a energia de um sinal elétrico em movimento. No entanto, vale destacar o baixo rendimento encontrado nestes transdutores. Segundo exemplo de aplicação de potência apresentado por Silva e Silva [10], devido ao baixo rendimento, característica intrínseca aos falantes eletrodinâmicos, quase toda a potência elétrica aplicada é transformada em calor. Um alto-falante típico, por exemplo, tem eficiência de 2%. Isso implica que para cada 100 Watts aplicados na bobina 98 Watts são transformados em calor e apenas 2 Watts em potência acústica.

Tal efeito de baixo valor de rendimento entre a conversão de energia foi estudado no passado. Segundo Zuccatti [52] a eficiência de conversão de energia nos alto-falantes é muito baixa, tipicamente de 1% a 5% para sistemas de radiação direta e de 10% a 40% para sistemas tipo corneta. Os sistemas tipo corneta são, no entanto, aplicáveis a faixa de altas frequências e possuem uma maior taxa de distorção harmônica, em geral.

Três sistemas distintos, mas, interligados entre si, operam em uníssono em um transdutor eletrodinâmico (Dickason [14]):

- Sistema motor: composto pela placa frontal, peça polar, ímã permanente, bobina móvel e placa traseira;

- Diafragma: normalmente um cone (em papel, metal, plástico ou outro material), com um domo protetor e mecanicamente conectado à bobina;
- Centragem: consistindo de aranha, que liga a parte inferior do cone e bobina à carcaça do alto-falante e do anel de suspensão exterior, que liga a parte superior do cone à carcaça do alto-falante.

Todos os componentes que compõem os três sistemas apresentados possuem extrema relevância no funcionamento do transdutor e na resposta entregue. Cada componente e material utilizado possui suas características e propriedades mecânicas e eletro-magnéticas.

#### 2.2.1.1 Sistema motor: bobina e ímã

O sistema motor é composto basicamente por cinco partes, que são: placa frontal e peça polar que, em conjunto, compõem o entreferro, ímã permanente, bobina móvel e placa traseira (Figura 2.5). As placas traseira e frontal e a peça polar são construídas de um material de alta permissividade magnética, como o ferro, e proporcionam um caminho cômodo para o fluxo magnético gerado pelo ímã permanente. O ímã é usualmente feito de ferrite cerâmica, em forma de anel. O circuito magnético fecha-se no entreferro, produzindo um campo magnético intenso entre a peça polar e a placa frontal. Caso uma corrente alternada senoidal seja aplicada à bobina móvel, ter-se-á um fluxo de corrente em um determinado sentido durante o semiciclo positivo, o que deslocará o cone em uma direção, dada pela regra da mão esquerda. Quando o fluxo de corrente se inverte, durante o semiciclo negativo, obriga o deslocamento do cone a tomar o sentido oposto, consequência das sucessivas atrações e repulsões dos dois campos (Dickason [14]). Desta forma, este item visa apresentar em detalhes os componentes deste sistema.

#### **Motor eletromagnético:**

O motor eletromagnético é composto pelo circuito magnético e pela bobina. Sua função é produzir a força eletromagnética conforme a Equação 2.1,

$$\vec{F}_{\text{mag}} = (\beta l) \vec{I}, \quad (2.1)$$

onde  $\vec{F}_{\text{mag}}$  é a força que move a bobina axialmente, dada em Newtons (N),  $\beta$  é o valor do campo magnético dado em Tesla (T),  $l$  é o comprimento do enrolamento do fio da bobina imerso no campo magnético, dado em metros (m), e  $\vec{I}$  é o valor da corrente alternada aplicada na bobina, dada em Ampère (A).

Nos próximos itens é apresentado como se forma esta força que moverá, em última instância o sistema móvel (bobina, cone, protetor, centragens) do alto-falante.

### Circuito magnético:

O objetivo do circuito magnético é conduzir e concentrar as linhas de campo na região onde será colocada a bobina. Esta região é chamada de entre-ferro ou *gap*. O circuito magnético é desenhado de forma a ser o menor possível para um dado campo desejado, pois o custo do sistema motor é, geralmente, maior que os demais componentes do alto-falante. Desta forma, a escolha do desenho (forma) do circuito, quanto do material utilizado é muito importante. A Figura 2.5, apresenta a forma mais utilizada para o circuito magnético:

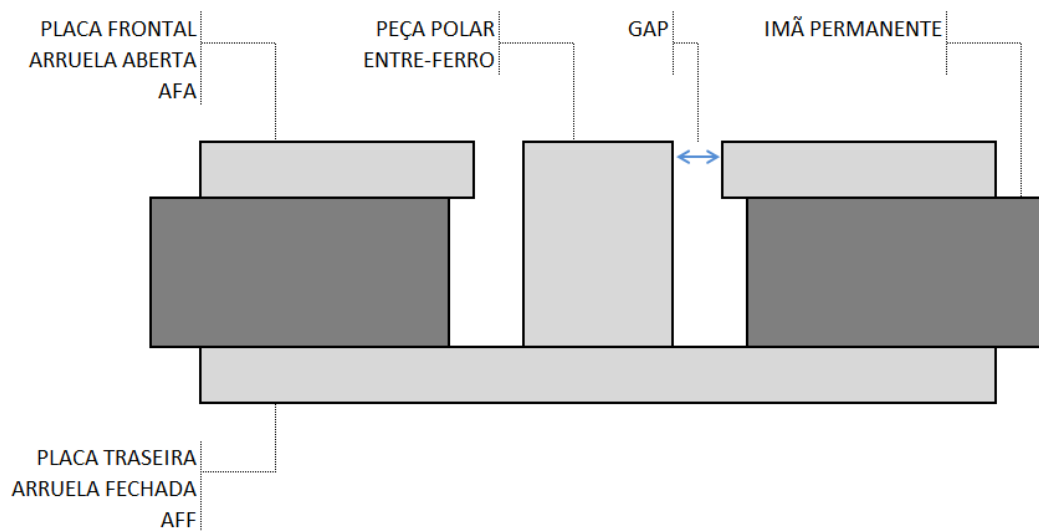


Figura 2.5 – Circuito magnético tradicional de um alto-falante.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Na sequência, são apresentadas algumas peculiaridades do circuito magnético:

#### a) Quanto ao material:

As placas frontal e traseira bem como a peça polar, devem conduzir as linhas de campo até o *gap*, e, portanto, devem ter alta permeabilidade magnética, ou seja, devem ser feitas de materiais magnéticos *soft*, tipicamente ferro. Materiais como aço doce (ferro com baixo teor de carbono) ou ferro fundido são utilizados, porém, o aço doce é a melhor escolha, pois possui maior permeabilidade magnética. Na indústria, geralmente, as placas frontal e traseira são fabricadas através do processo de estampagem, portanto, usa-se como matéria-prima uma chapa de aço doce laminado onde, com o uso de uma prensa, o aço é cortado na forma de disco e arruela.

Para o ímã permanente, existem basicamente três tipos de materiais utilizados na indústria: os de alnico, os cerâmicos como ferrite e os de terras raras. Alnico (composto de ferro com

alumínio, níquel e cobalto) foi muito utilizado nas décadas de 1940 a 1960, porém, seu custo elevou-se muito na década de 1970 e, por isso, seu uso foi praticamente abandonado. O imã de terras raras (samário-cobalto ou neodímio-ferro-boro) também tem um custo muito elevado. A diferença entre os três grupos não se dá apenas pelo custo, mas, pelo valor de sua remanência (para efeitos práticos, quanto maior a remanência maior será o campo magnético proporcionado pelo imã).

A Tabela 2.2 mostra valores da remanência para os imãs citados anteriormente:

Tabela 2.2 – Valores médios de Remanência para imãs permanentes.

Item	Material do imã	Remanência (Gauss)
1	Alnico	9000
2	Ferrites	3800
3	Samário-Cobalto	10000
4	Neodímio-Ferro-Boro	12000

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Ao analisar a Tabela 2.2, percebe-se que os imãs de neodímio-ferro-boro possuem uma remanência três vezes maior que os de ferrite. Isto faz com que para se obter um determinado campo no *gap*, o volume do imã de neodímio pode ser bem menor que o de ferrite.

Portanto, os alto-falantes que utilizam imãs de terras raras possuem um circuito magnético bem menor: o imã geralmente é uma pastilha, colocada na posição da peça polar. Apesar destas vantagens, o custo destes imãs ainda é muito elevado se comparado aos imãs de ferrite (2,5 vezes maior). Atualmente, são amplamente utilizados na indústria os imãs de ferrite de bário e de estrôncio. O ferrite de bário é feito a partir de metalurgia do pó, prensando-se a massa molhada de  $BaO(Fe_2O_3)_6$  na forma de um anel que, depois de curada, é sinterizada.

b) Quanto à forma:

A forma do circuito influenciará no confinamento do campo magnético no *gap*. Os alto-falantes possuem um campo no *gap* que varia de 0,6 a 1,3 T. Para aumentar este valor deve-se diminuir o *gap* ou aumentar o volume do imã. Conforme o desenho do circuito magnético, pode-se perder intensidade do campo devido ao desvio de linhas de campo para fora do *gap*, como mostra a Figura 2.6.

As peças do circuito magnético geralmente são coladas: arruelas aberta e fechadas fixadas diretamente através de adesivo no disco do imã. A peça polar, na grande maioria dos casos também é fixada através de adesivos na placa traseira. Há transdutores onde a peça polar e a

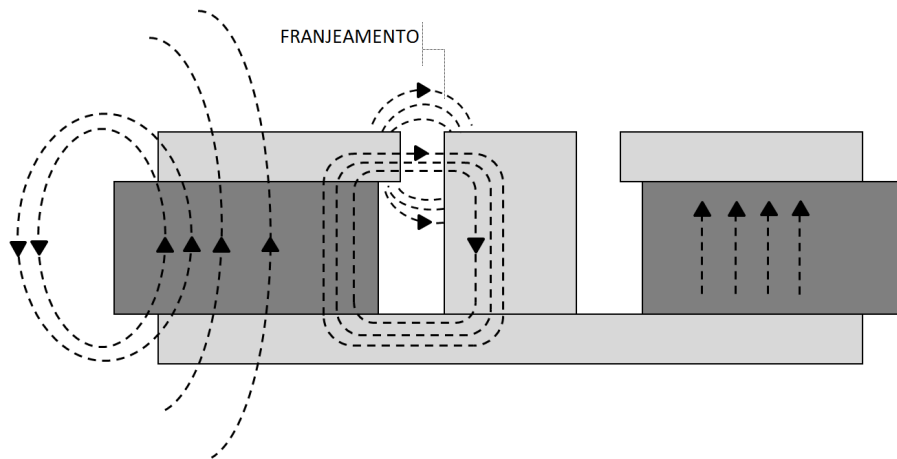


Figura 2.6 – Franjamento das linhas de campo em CM de um alto-falante característico.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

arruela fechada são fabricadas através de usinagem, e nestes casos, se tem apenas uma única peça. Embora este processo de usinagem, ou até mesmo, através de forjaria seja mais oneroso, o comportamento das linhas de campo tende a ser mais uniforme devido à inexistência de troca de meios: placa traseira X peça polar, quando estas duas peças formam um único componente sem soldas ou uso de adesivos.

Quando o ímã é magnetizado, a magnetização orienta-se paralelamente ao eixo de simetria do ímã, como apresentado na parte direita da Figura 2.6. Porém, como o ímã está dentro do circuito magnético, as linhas de campo tendem a segui-lo. As linhas passam do ímã para a arruela, ou seja, mudam de meio material (com permeabilidades magnéticas diferentes) e mudam a sua direção, como mostra a Figura 2.7.

As continuidades na interface das componentes normais de  $\vec{B}$  e das componentes paralelas de  $\vec{H}$  levam para as Equações 2.2 e 2.3:

$$B_1 \cos \phi = B_2 \cos \theta, \quad (2.2)$$

$$H_1 \sin \phi = H_2 \sin \theta, \quad (2.3)$$

como  $B = \mu H$ , dividindo a Equação 2.3 pela 2.2, temos a Equação 2.4:

$$\mu_1 \tan \theta = \mu_2 \tan \phi, \quad (2.4)$$

logo, a inclinação da linha de força quando ela está na arruela vai depender da inclinação com que ela entra na mesma e da razão da permeabilidade entre os meios.

Se a linha de força entrar perpendicularmente na arruela ( $\tan \theta = 0$ ), ela não se desviará e atravessará a arruela, não sendo conduzida ao *gap*. O desenho do circuito introduz assimetrias



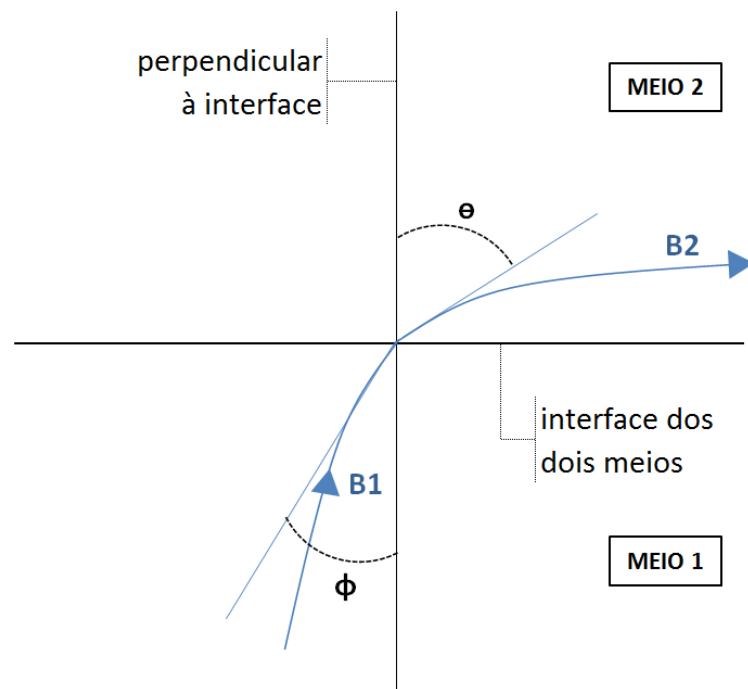


Figura 2.7 – Alterações nas linhas de campo devido mudança de meio em componentes do CM.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

que afastam parcialmente a magnetização da direção do eixo de simetria do ímã. Pode-se reduzir ainda mais as perdas procurando tornar mais suave o trajeto das linhas de campo. Na Figura 2.8 pode-se verificar um exemplo de desenho que substitui os ângulos retos formados pelo pino com a arruela e com o disco por ângulos maiores que  $90^\circ$ .

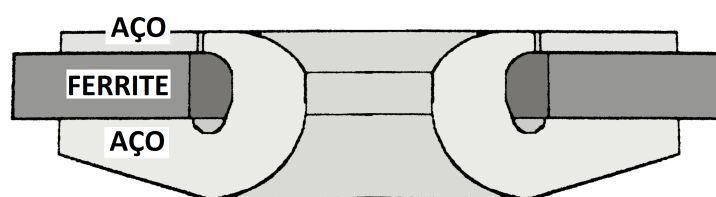


Figura 2.8 – Circuito magnético otimizado em um CM.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Outra perda de confinamento de campo no *gap*, é devido ao franjamento das linhas de força nesta região, como mostra a Figura 2.6. O campo magnético deveria ser constante em toda a região do *gap*. Porém, ele se dispersa quando sai da região delimitada pela espessura da arruela, formando um franjamento. O campo na região do franjamento é menor do que no *gap*.

Este é um problema que, inclusive, causa distorção no som emitido pelo alto-falante.

O ideal seria que todo o campo se confinasse no *gap*. Alternativas de projeto do circuito são estudadas de forma a atenuá-lo ou a tentar fazer com ele seja simétrico em relação à arruela. Neste último caso, a bobina sentiria, pelo menos, simetria no franjeamento, como mostra a Figura 2.9.

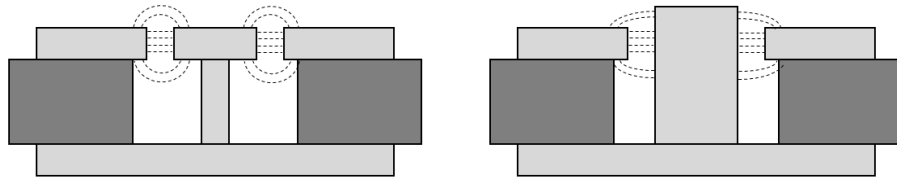


Figura 2.9 – Propostas para ajuste da simetria do franjeamento no CM.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Cerca de metade do fluxo magnético total do ímã é perdido para fora do *gap*, ou seja, não é utilizado efetivamente pelos alto-falantes fabricados com o desenho tradicional.

#### **Configuração do Circuito Magnético e Bobina:**

Quando a bobina é colocada no *gap* do circuito magnético, e uma corrente elétrica alternada passa por ela, surge a força  $\beta l \bar{I}$  que move axialmente a bobina. Dependendo da configuração (espessura da arruela e comprimento de fio sob ação do campo magnético) a força  $\beta l \bar{I}$  será maior ou menor. Deve-se ter em mente que a situação não é estática e sim dinâmica: a bobina se movimenta dentro do *gap*, podendo atingir a região de franjeamento ou mesmo regiões onde não existe mais campo, variando o fator de força  $\beta l$ , o qual, idealmente, deve ser constante. A variação do fator  $\beta l$  permite a formação de harmônicos no movimento da bobina, provocando distorção no som final. Existem três tipos tradicionais de configuração do circuito magnético e bobina, como mostra a Figura 2.10.

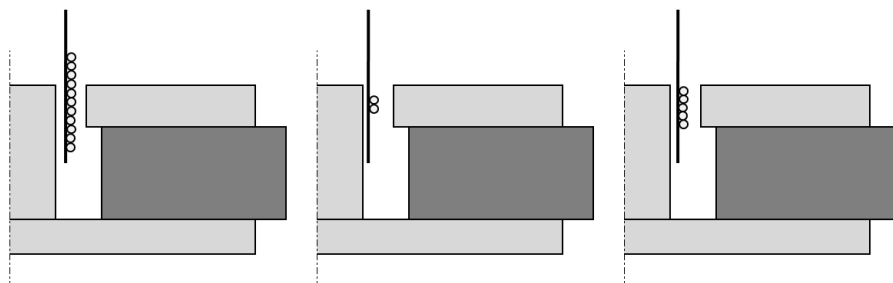


Figura 2.10 – Posicionamento do enrolamento da bobina no *gap* de um alto-falante.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

As situações apresentadas à esquerda e central são utilizadas quando o alto-falante possui bobina de grande excursão. Caso dos *woofers* para graves e sub-graves. Nestes casos,

mantém-se o fator  $\beta l$  constante (dependendo, é claro, da excursão da bobina não ser grande demais). Já a situação mostrada em à direita na Figura 2.10 é utilizada em alto-falantes com pequena excursão, caso dos médios e *tweeters* utilizados em frequências médias e altas.

- Caso (a): se o franjamento for simétrico, o comprimento do enrolamento imerso no campo deve ser constante, durante o movimento da bobina. A desvantagem deste desenho é que a massa da bobina é grande, o que diminui a eficiência do alto-falante.

- Caso (b): a bobina poderá excursionar sempre dentro do campo constante do *gap*, o que é uma vantagem em relação ao caso (a). Porém, a bobina tem comprimento de enrolamento ( $l$ ) menor e para que no caso (b) se atinja o valor de  $\beta l$  do caso (a),  $\beta$  teria de ser maior, implicando o uso de um ímã de maior volume.

- Caso (c): reduz-se tanto a massa da bobina, quanto o tamanho do ímã, porém está mais sujeito a distorções (*woofers*).

O fio condutor da bobina é enrolado em um corpo (conectado mecanicamente ao diafragma) que pode ser papel kraft, alumínio, kapton (“polyimide”) ou nomex (“polyimide”). O corpo de papel é muito utilizado em alto-falantes de baixa potência elétrica, pois o seu limite de temperatura está em torno de  $100^\circ\text{C}$ , mas, com nomex este limite cresce para  $150^\circ\text{C}$ . Usando kapton com isolamento e adesivos adequados pode-se chegar até  $350^\circ\text{C}$ . Com alumínio, também pode-se chegar a essa temperatura e com a vantagem de que a dissipação da potência é aumentada. As desvantagens do uso do alumínio são: problemas com a sua dilatação térmica (o kapton apresenta maior estabilidade térmica), e a formação de correntes de *Foucault* durante a excursão da bobina no *gap*, que provocam aumento da distorção harmônica do alto-falante.

A análise térmica da bobina é de suma importância. O aquecimento da bobina e sua possível queima são limitadores do funcionamento do alto-falante. O limite térmico do alto-falante está relacionado ao material do corpo e do fio (incluindo isolantes e adesivos) da bobina, à bitola do fio utilizado e à transferência de calor da bobina ao restante do conjunto magnético.

Esta última determina a temperatura final da bobina e a sua resistência elétrica, como mostra a Equação 2.5,

$$T_B = T_A + \left( \frac{R_B}{R_A} - 1 \right) \left( T_A - 25 + \frac{1}{\alpha_{25}} \right), \quad (2.5)$$

onde,  $T_A$  e  $T_B$  são temperatura inicial e final em  $[\text{°C}]$ ,  $R_A$  e  $R_B$  são os valores de resistência da bobina nas temperaturas  $T_A$  e  $T_B$  em  $[\Omega]$ , respectivamente e  $\alpha_{25}$  é o coeficiente de temperatura do material do condutor, a  $25^\circ\text{C}$  (Silva [46]).

Este aumento da resistência com a temperatura tem sérias implicações: se a temperatura da bobina for aumentada em 250 °C, por exemplo, a resistência da bobina praticamente dobrará e a potência dissipada cairá. Porém, a eficiência do alto-falante cairá também e este fenômeno é chamado de *power compression* por efeito térmico: aumenta-se a potência elétrica injetada, porém o nível de pressão sonora não cresce na proporção esperada. A Figura 2.11 ilustra a transferência de calor da bobina para o circuito magnético.

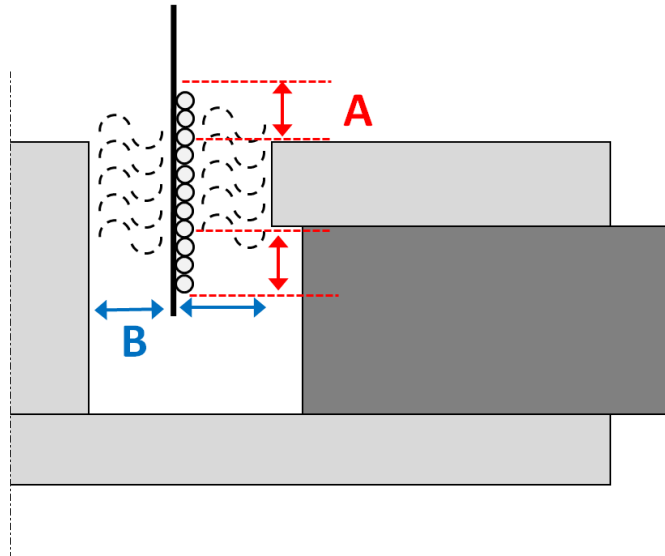


Figura 2.11 – Dissipação térmica da bobina móvel posicionada no CM.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Considerando o fator temperatura no enrolamento da bobina, quanto maior a largura do *gap*, menor a transferência de calor para o conjunto magnético. Ainda na Figura 2.11, esta largura do *gap* é apresentada pela letra "B" e reduzindo esta largura, além de otimizar a transferência de calor entre bobina e CM, aumenta-se, também, a sensibilidade do transdutor, uma vez que o fluxo magnético também é acrescido. De forma geral, alto-falantes com bobina com corpo de alumínio em *gaps* pequenos / estreitos, são capazes de suportar potência elétrica elevada, uma vez que, o espaço de ar entre enrolamento e *gap* é reduzido.

Na mesma Figura 2.11 a indicação "A" apresenta a região do enrolamento onde a transferência de calor é prejudicada por ocorrer, em sua maior parte, apenas pela dissipação térmica junto ao ar. A parte do enrolamento que fica junto a placa frontal ou arruela de ferro aberta (AFA), que forma o *gap* do transdutor, possui a melhor taxa de transferência de calor devido a sua proximidade com os componentes metálicos do conjunto magnético (CM). Todo o conjunto magnético atua, também, como um dissipador térmico do alto-falante.

O tipo de configuração circuito magnético/bobina também influencia a dissipação de

calor. Na Figura 2.10, as duas últimas configurações dissipam melhor o calor, já que possuem maior área de contato bobina/região do *gap*. Outra forma de se melhorar a dissipação é fazer furos nos circuito magnético (principalmente na peça polar) que servirá de ventilação para a bobina (a face superior da peça polar é refrigerada pelo movimento de ar gerado pelo diafragma).

Por último, pode-se utilizar um líquido magnético condutor de calor chamado Ferrofluido, que é colocado no *gap* para melhorar a dissipação de calor. Ele é uma substância coloidal com partículas suspensas de  $Fe_3O_4$ . Cada partícula possui momento magnético permanente e quando submetida a um campo magnético, ele se alinha, fazendo com que o fluido adquira um momento magnético, permanecendo suspenso no *gap*. O Ferrofluido não chega a interferir significativamente no campo magnético ou no funcionamento do alto-falante. Seus efeitos são:

- Ganho de transferência de calor para o ferro e conseqüente aumento na capacidade da bobina de suportar a potência elétrica. Sua condutividade térmica é de 6 a 10 vezes maior que a do ar;
- Aumenta o amortecimento mecânico. Por causa da sua viscosidade, o ferrofluido amortece o movimento da bobina no *gap*, diminuindo o fator da qualidade mecânico ( $Q_{ms}$ ) do alto-falante;
- O Ferrofluido é mais utilizado em alto-falantes com baixa excursão de bobinas (*tweeters*), porém, atualmente já existem tipos de ferrofluidos que podem ser utilizados em *woofers*.

#### 2.2.1.2 Diafragma: cone e domo

Com o motor eletromagnético consegue-se a primeira conversão: energia elétrica em mecânica. Para transformar energia mecânica em energia acústica, acopla-se à bobina um diafragma que se movimenta junto com ela (na mesma frequência) e desloque (compressão e rarefação) o ar à sua frente de forma a produzir som. Os alto-falantes eletrodinâmicos utilizam dois tipos de diafragma: o cone e o domo. A Figura 2.12 apresenta ambos os tipos de diafragma.

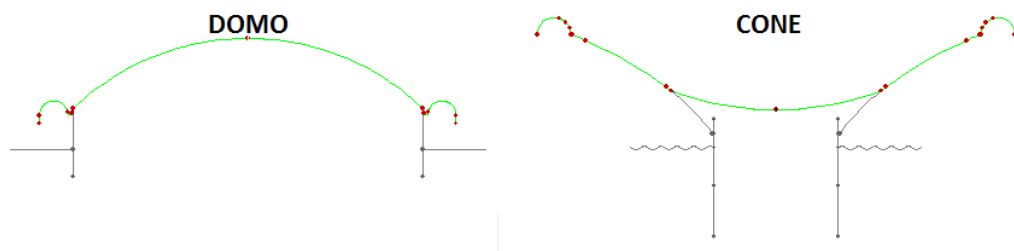


Figura 2.12 – Comparação entre diafragmas do tipo domo e cone.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

### Cone:

A primeira ideia quando se pensa em um diafragma funcionando como um pistão rígido é utilizar um disco plano. Porém, a massa necessária para torná-lo suficientemente rígido seria muito grande, o que diminuiria a eficiência do alto-falante. A solução encontrada foi fazer um diafragma em forma de cone, cuja rigidez é muito maior, permitindo diminuir a massa até obter uma membrana bem leve.

#### a) Modos vibracionais:

Dependendo do tamanho, material e geometria do cone, até certa frequência, ele funciona como um “pistão rígido”, ou seja, todos os seus pontos possuem a mesma velocidade e o mesmo deslocamento. Ultrapassada esta frequência o cone se “quebra”, com certas áreas – delimitadas por curvas fechadas onde não há vibração – oscilando com frequência da força motriz.

Cada região oscilante funciona como uma fonte sonora. Estas áreas constituem os modos vibracionais. Eles se formam porque ondas se propagam no cone partindo da bobina, subindo até a periferia do cone (borda) e retornando até a bobina formando ondas estacionárias. As formas e materiais do cone e da borda influenciarão na formação das ondas estacionárias. Os modos vibracionais interferem no som que seria produzido: cada área oscilante emite uma onda sonora que interfere com as demais, construtiva ou destrutivamente, em certas frequências, formando vales e picos, na região B, na curva de resposta do alto-falante como mostra a Figura 2.13.

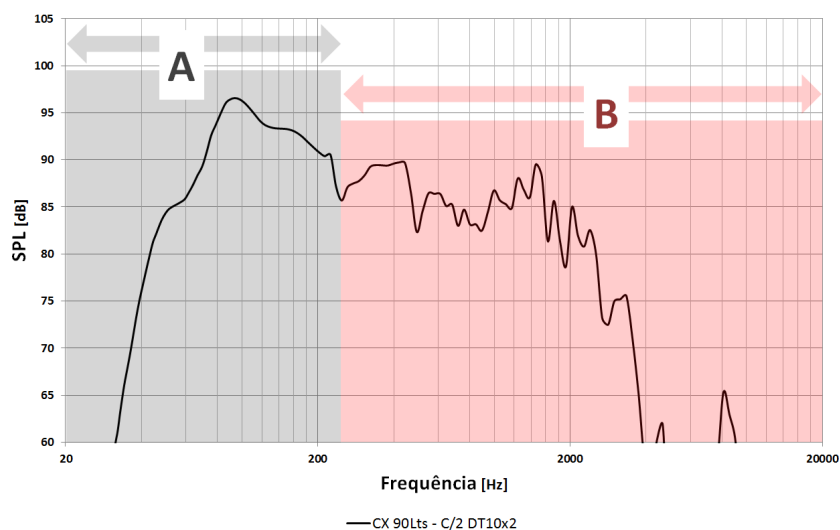


Figura 2.13 – Curva de resposta de um alto-falante do tipo *woofer*.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

O primeiro pico apresentado na região A da Figura 2.13, por exemplo, é o  $F_s$  (frequência de ressonância) e não se aplica, porque é uma ressonância do sistema massa (cone) - mola (aranha/suspensão). Os modos vibracionais podem ser desejáveis ou não, dependendo da aplicação do alto-falante. Quando se deseja baixas frequências e que o alto-falante só trabalhe como um “pistão rígido”, então é desejável diminuir os modos e procurar obter uma resposta plana em toda a faixa de operação.

Explicar a física dos cones dos alto-falantes, geralmente, implica em iniciar por uma discussão teórica sobre a radiação de um pistão, infinitamente rígido, se movendo no ar. Devido à impedância acústica de radiação aplicada ao pistão, a transferência de movimento do pistão para o ar é limitada e dependente da frequência.

Para um alto-falante ideal, composto por um diafragma rígido ligado ao sistema de suspensão mecânica, o limite na faixa inferior do espectro de áudio seria dado pela frequência de ressonância, que é definida pela massa total do elemento móvel e pela rigidez do sistema de suspensão. (abaixo da qual a capacidade de transferir energia diminui).

No caso prático, os cones não são infinitamente rígidos e irão deformar-se de algum modo, dependendo das características do material com que forem construídos, de sua geometria e das condições de contorno as quais estão sujeitos.

#### b) Formas:

Existem duas formas básicas de cones: os cones retos e os cones curvos ou exponenciais. A diferença entre os dois é que os cones exponenciais possuem modos de vibração menos intensos que os cones retos, portanto, possuem uma curva de resposta mais plana. Porém, eles não suportam altas potências em baixa frequência (região de "pistão rígido") quanto os cones retos pois, para um dado peso, eles não são tão rígidos. A Figura 2.14 apresenta os dois tipos tradicionais de formas para cones.

Segundo Dickason [14], os cones de forma cônica tendem a apresentar um elevado pico no extremo superior da sua faixa de resposta sendo sua localização determinada, em parte, pelo ângulo de abertura do cone. Comparando com a forma convexa, a banda passante é um pouco mais larga, tendendo a produzir uma resposta de frequência mais plana e apenas um moderado pico na resposta de altas frequências (menor eficiência nas altas frequências) com uma ligeira redução na banda passante em comparação com os cones planos.

Dependendo do número, tamanho e espessura da parede do cone, os frisos conseguem dissociar a parte central (região da bobina) da extremidade (região da borda), em termos dos

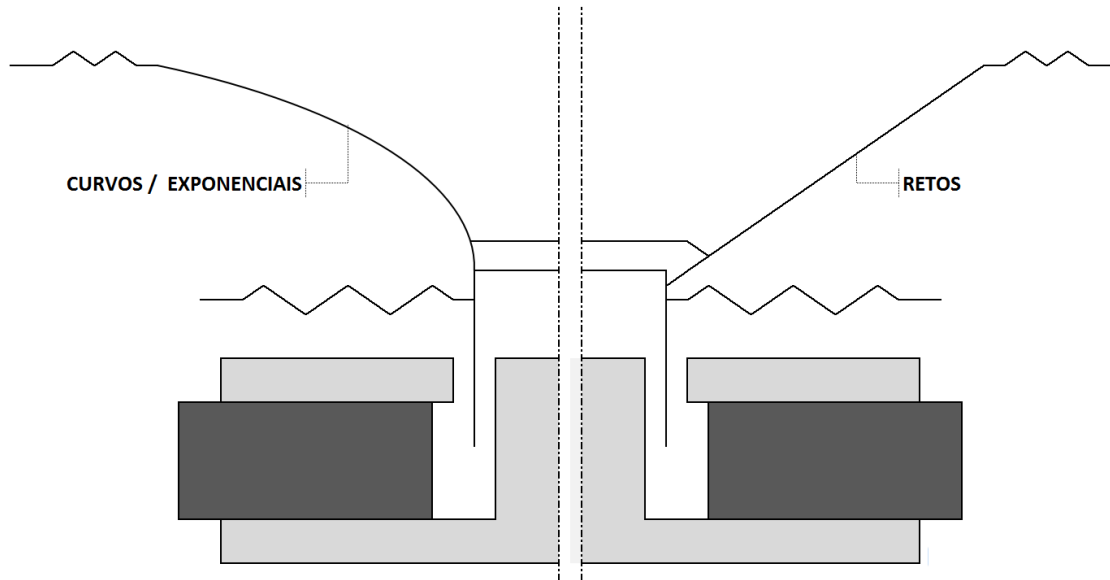


Figura 2.14 – Formas básicas para cones de alto-falantes.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

modos vibracionais. Existem, também, os cones ovais ou em forma de elipse. Eles possuem uma resposta de menos intensidade sonora em baixa frequência em relação ao cone circular, porém, também possuem modos vibracionais com menores amplitudes em comparação aos circulares. Os cones circulares mais utilizados na indústria podem variar seu diâmetro de 1 1/2" a 3" (*tweeter*), 4" a 6" (médios), e 8" a 21" (*woofers* e *subwoofers*).

Outra forma de diminuir os modos vibracionais são os frisos colocados na parte central do cone, o que é apresentado na Figura 2.15.

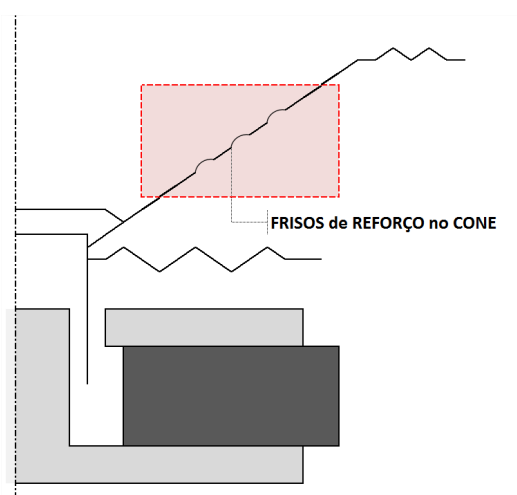


Figura 2.15 – Frisos para reforço estrutural do cone do AF.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Devido à influência da geometria nos modos vibracionais de uma estrutura, diferen-



tes formas de cones possuem diversas características de resposta do transdutor. A resposta de frequência dos cones convexos pode ser modificada e controlada através de sua curvatura (Dickason [14]).

c) Materiais:

Os cones mais utilizados são os de massa celulósica. A massa pode ser composta de fibras de celulose de vários tipos, como: kraft, sulfite, algodão, linho, entre outros. A proporção das fibras na massa e a densidade do cone serão responsáveis pelo seu desempenho mecânico e acústico. Para aumentar a resposta em alta frequência, são utilizadas resinas impregnantes no cone. Mais recentemente, o cone de plástico (o mais utilizado é o de polipropileno) vem se tornando muito popular. Sua estabilidade mecânica é excelente, e ele possui a característica de não absorver água (não é higroscópico), e sua reprodutibilidade na fabricação é muito maior que a do cone de massa celulósica. Ele possui menos modos vibracionais, porém, quando eles começam a ocorrer são muito intensos. Outro problema é que quando submetidos a grande potência podem mudar a sua forma ou até, em casos extremos, rachar. Entretanto, utilizado de maneira correta, dentro de suas especificações, este tipo de cone é de grande eficiência. Existem, também, cones de metal (ligas de alumínio) e espuma com plástico, porém, são menos utilizados que os de plástico e de massa celulósica.

Junto ao cone, formando o diafragma, existe outro componente do alto-falante: a calota ou protetor. Ele é colocado acima da bobina, colado ao cone, como apresentado no esquema técnico do alto-falante. Ele possui a função básica de proteger a região do *gap*, porém participa da formação do som junto ao cone. Vários materiais são utilizados para sua fabricação, tais como: massa celulósica, acetato, alumínio e tecido. Assim, como no cone, nele se formam modos vibracionais, dependendo do tamanho, forma e material. A faixa de frequência médias-altas pode ser bastante influenciada pelo protetor.

**Domo:**

Outra Forma utilizada como diafragma é o domo. Ele possui a forma de uma calota esférica e a bobina é colocada em seu perímetro como mostra a Figura 2.16. O domo geralmente é feito de um tecido resinado e sua forma é dada em uma ferramenta quente. São utilizadas, também, membranas de formas e materiais (titânio, berílio ou material plástico por exemplo) diferentes que o domo de tecido apresentado na Figura 2.16.

O domo é utilizado em *tweeters* e *drivers* que trabalham em frequências médias-altas. Considera-se que sua radiação sonora é menos diretiva que a do cone, porém, isso só é verdade

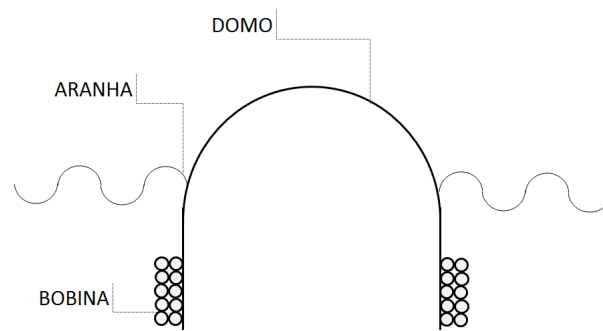


Figura 2.16 – Diafragma do tipo domo.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

a altíssimas frequências (para um domo de 25 mm de diâmetro, por exemplo, só acima de 16 kHz é menos diretivo).

### 2.2.1.3 Centragem: suspensão e aranha

A centragem (suspensão e aranha) possui duas funções básicas: centralizar a bobina dentro do *gap* e funcionar como a “mola” do alto-falante. Isto quer dizer que o movimento do cone, a frequência de ressonância, a resistência mecânica ( $R_{ms}$ ), o fator qualidade mecânico ( $Q_{ms}$ ) e o transiente do falante dependem da suspensão. Além disso, a suspensão é responsável por uma das não linearidades (não-linearidade elástica) do alto-falante que provocam distorções harmônicas. Com isso, o bom funcionamento do alto-falante depende intimamente da suspensão. A suspensão é a continuação do diafragma e faz a ligação entre o cone e a carcaça. Já a centragem é colada na junção cone/bobina e na forma da bobina, como mostra a Figura 2.17.

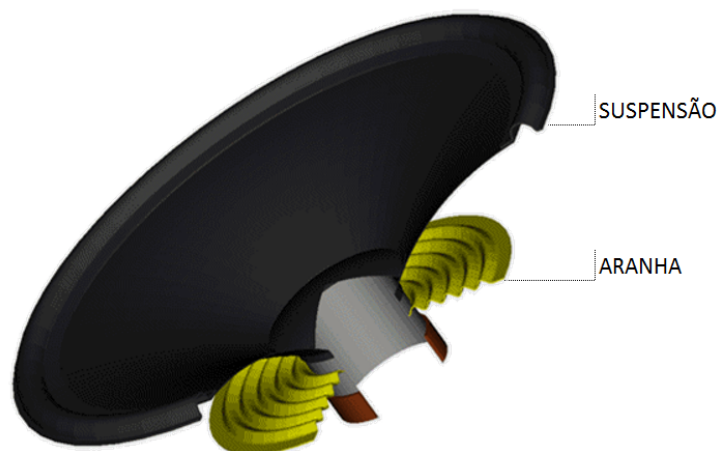


Figura 2.17 – Centragem do alto-falante através da aranha e suspensão.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

A suspensão, ou borda frontal, pode ser um prolongamento do cone de massa celulósica ou feita separadamente de vários materiais, como: espuma, tecido resinado, borracha e depois colada no cone. Ela possui, em geral, metade (ou menos da metade) do comprimento radial da centragem. Portanto, pode ser limitadora da excursão do alto-falante. Ela representa uma descontinuidade do diafragma, e por ter massa e compliância própria, pode ter uma ressonância separada. Se sua compliância for muito baixa, ela alterará o movimento do cone, provocando alterações no som final do alto-falante. Para baixas frequências, onde a excursão é maior, esta não linearidade pode provocar distorções. A solução é fabricar bordas com alta flexibilidade e baixas perdas internas.

A suspensão também altera os modos vibracionais citados anteriormente. Ela influencia grandemente na formação das ondas estacionárias no cone. A aranha ou anel de centragem inferior é feita, normalmente, de tecido (algodão ou poliéster, por exemplo) banhado com resina fenólica, na forma de um disco de ondas concêntricas. A compliância da centragem pode ser variada mudando-se a densidade da resina no banho ou o tecido utilizado.

Na indústria, este processo costuma ser chamado de impregnação, uma vez que se aplicam resinas e solventes no tecido. A compliância também depende do diâmetro e do número e tamanho de suas ondas. Se o processo for bem controlado, a compliância da centragem varia linearmente com a densidade do banho (se for utilizado um mesmo tecido). Os parâmetros utilizados para analisar os tecidos são: número de fios por trama e urdume, bitola do fio, gramatura (parâmetros descritivos) e a tração de ruptura do tecido.

A centragem deve ser a maior responsável, na suspensão, pela força restauradora (efeito “mola”) e, portanto, junto com a massa do sistema móvel determina a primeira frequência de ressonância do alto-falante. As grandes preocupações quando se pensa em anéis de centragem inferior são: a falta de linearidade elástica, que provoca distorções; e, a fadiga elástica, que faz com que a centragem se deforme e não volte para sua posição de repouso no alto-falante (efeito memória). A falta de linearidade elástica ocorre a partir de um determinado ponto da excursão do diafragma como mostra a Figura 2.18.

No caso da fadiga elástica, se a centragem não volta para sua posição normal (Figura 2.18), ou seja, se a bobina não estiver centralizada em relação a arruela, haverá perda do fator de força ( $\beta l$ ) do falante e conseqüente diminuição da sensibilidade e aumento do fator qualidade total ( $Q_{ts}$ ). Para *woofers* e *subwoofers* com grandes excursões de diafragma, a fadiga e a não linearidade são críticas. A solução está no uso de materiais adequados e no projeto da

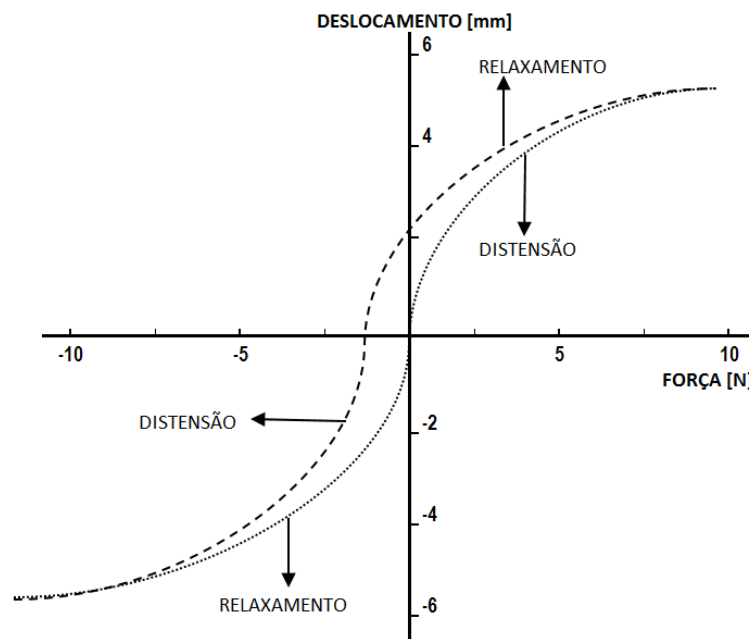


Figura 2.18 – Limites da zona de linearidade da centragem de um AF.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

centragem.

### 2.2.2 Pârametros de avaliação de alto-falantes

O alto-falante é um tipo de transdutor com conversões elétricas-mecânicas-acústicas, obviamente, uma série de exigências podem ser atribuídas para a avaliação de woofer, driver ou tweeter. Entretanto, nas indústrias deste ramo são escolhidos alguns parâmetros de maior relevância, visando diminuir a complexidade do processo de desenvolvimento, apresentação de propostas para clientes não habituados com parâmetros específicos e, por fim, a avaliação se o alto-falante atende ou não a determinado em projeto. Tradicionalmente, os departamentos de Engenharia De Produto são clientes internos de outros setores da companhia, desta forma, quando a equipe de Produto é acionada para um novo desenvolvimento, há a indicação de quais parâmetros e valores deve-se atingir com o novo produto. Essas informações fornecidas para o desenvolvimento são chamadas de Dados de Entrada e os resultados entregues pela Engenharia De Produto, juntamente com o alto-falante são os Dados de Saída. Portanto, neste item, são abordados os cinco principais indicadores ou parâmetros para o desenvolvimento de um transdutor. São eles:

- Resposta em Frequência;
- Sensibilidade;

- Impedância nominal;
- Potência Elétrica;
- Custo.

Na grande maioria dos desenvolvimentos de novos produtos, o maior desafio da engenharia está em atender, não a um avanço tecnológico ou necessidade técnica, mas sim, justamente, ao quinto parâmetro, que é o Custo. Sabe-se que, os recursos financeiros para novos desenvolvimentos, geralmente, são limitados e estão diretamente ligados ao valor de mercado no qual será comercializado o item. Logo, é necessário encontrar e atender os quatro parâmetros iniciais e consumir pouco recurso, ou seja, ter um custo final baixo. Neste item de Avaliação de alto-falantes, não será abordado o parâmetro Custo, embora, deva-se ter entendimento que nem sempre, a melhor opção técnica atende ao solicitado nos Dados de Entrada. Os demais parâmetros serão apresentados de forma objetiva, pois servem para avaliar o desempenho da grande maioria dos alto-falantes para uso comercial e profissional.

#### 2.2.2.1 Resposta em Frequência

A curva de resposta é a medição do nível de pressão sonora (SPL) em dB, em função do logaritmo da frequência. As medições são feitas em campo livre (geralmente em câmaras anecóicas). Gera-se, então, um gráfico similar ao mostrado na Figura 2.19.

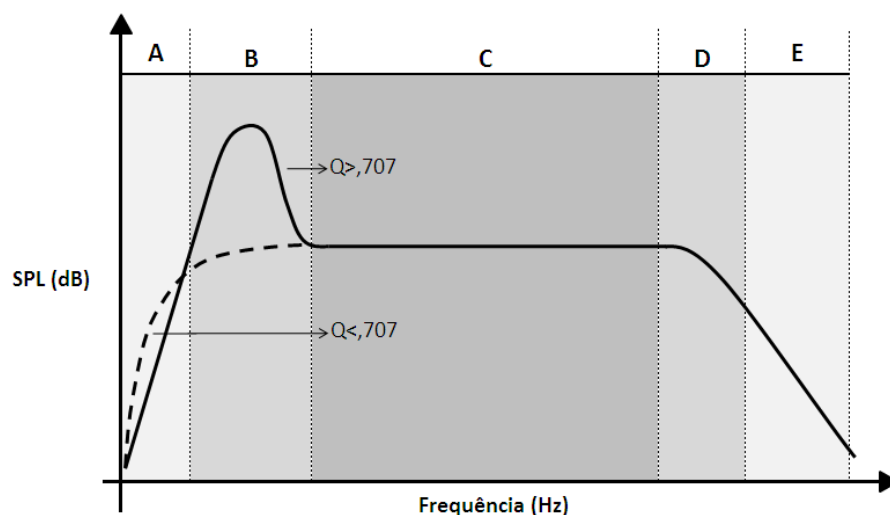


Figura 2.19 – Curva de resposta teórica para um alto-falante com suas regiões.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Quanto à curva de resposta da Figura 2.19, pode-se analisar cinco regiões:

- Região A: É a região anterior à frequência de ressonância. É controlada basicamente pela rigidez da suspensão, normalmente chamada de *stiffness-controlled*.

- Região B: É a região onde está a frequência de ressonância. Um pico pode ocorrer na ressonância para  $Q_{ts}$  (fator qualidade total) maior que 0,707.

- Região C: após a frequência de ressonância, a curva de resposta se estabiliza em um patamar. O valor deste patamar dependerá da resistência elétrica da bobina, da massa do sistema móvel  $M_{ms}$  (cone+calota+suspensão+aranha+bobina), do fator de força  $\beta l$  e da área do cone  $S_d$ .

- Região D: É a região de possíveis ressonâncias do alto-falante (cone, aranha e suspensão). Neste caso, ocorrerão picos e vales nesta faixa de frequências.

- Região E: Nesta região a impedância acústica torna-se grande e a curva tende a cair, diminuir, (12 dB por oitava).

Nas regiões D e E, regiões de possíveis ressonâncias, ocorrem os vales e picos por causa dos modos vibracionais do cone, aranha, calota e suspensão. Devido a estes modos, a curva pode se estender a uma faixa de frequências mais alta do que na região E. Esta última região também é influenciada pela indutância da bobina: quanto maior a indutância, maior a queda do nível de pressão sonora (SPL). Quanto às regiões A e B, sua forma dependerá do  $Q_{ts}$  do alto-falante, como mostra a Figura 2.19. Para  $Q_{ts}$  abaixo de 0,707, as curvas possuem uma queda em baixa frequência mais suave, atingindo uma faixa mais larga em baixa frequência. Para  $Q_{ts}$  acima de 0,707, a faixa de graves fica mais estreita, mas reforçada (pico) na frequência de ressonância. A partir da curva de resposta do alto-falante, duas especificações técnicas muito importantes podem ser extraídas: a resposta em frequência e a sensibilidade

A resposta em frequência é a faixa onde o alto-falante possui sua resposta de forma mais plana. Ela corresponde, de modo geral, às regiões B, C e D, da curva de resposta apresentada na Figura 2.19. Mais precisamente falando, ela vai desde a frequência de ressonância do transdutor até onde a curva decai 10 dB em relação ao patamar da região C.

O tipo de alto-falante é, principalmente, determinado pela resposta em frequência. A Tabela 2.3 apresenta a nomenclatura atribuída para cada tipo de transdutor considerando sua respectiva resposta em frequência.

Cabe a cada fabricante de alto-falantes classificar o seu produto conforme julgar necessário. Não há normativa que controle essa classificação. Em alguns casos, a resposta de frequência é considerada juntamente com o a estratégia comercial a qual o projeto busca aten-

Tabela 2.3 – Classificação do transdutor conforme sua resposta em frequência.

Classificação	Resposta em frequência
<i>Subwoofers</i>	20 Hz a 180 Hz
<i>Woofers</i>	90 Hz a 300 Hz
<i>Midbass</i>	250 Hz a 4,5 kHz
<i>Full range</i>	60 Hz a 10 kHz
<i>Drivers e Tweeters</i>	2 kHz a 20 kHz
<i>3-way</i>	60 Hz a 20 kHz

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

der. Visando demonstrar este apelo comercial durante o projeto do produto, novas classificações podem surgir, como exemplo, o caso dos *Super Tweeters*.

A curva de resposta de um transdutor, usualmente, é traçada com o alto-falante em caixas acústicas e, preferencialmente, em câmaras anecóicas. Muitos fabricantes adotam caixas de volume específicos e sintonias variadas, desta forma a curva de resposta do transdutor sofre alterações em seu formato, também chamado de *shape*.

A Figura 2.20 apresenta as curvas de respostas de um mesmo *woofer* em caixas acústicas seladas com volume de 455 l, 100 l, 65 l e em uma caixa acústica dutada com volume de 65 l. Percebe-se que o uso de caixas acústicas pode mascarar de forma positiva ou negativa (atenuando) a resposta de um determinado transdutor.

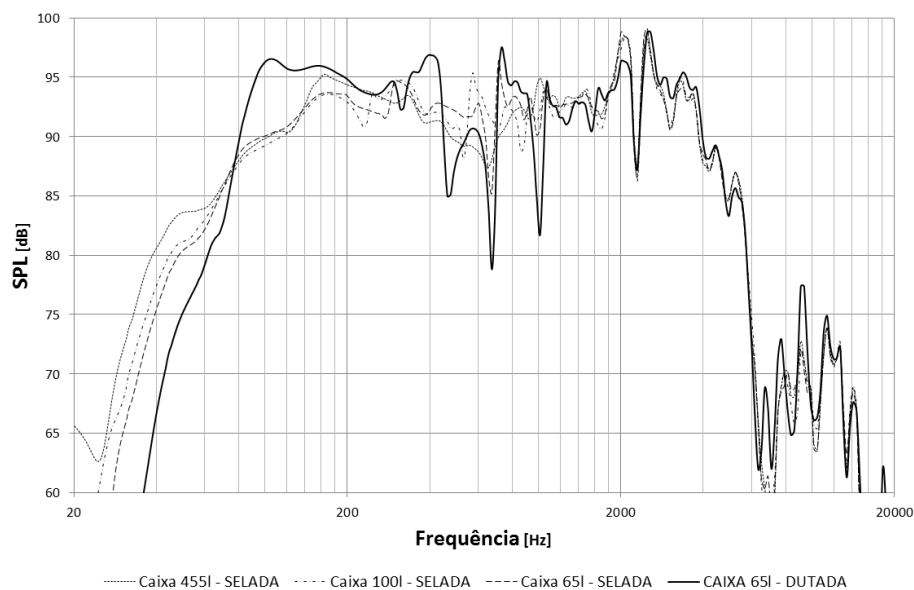


Figura 2.20 – Alterações na curva de resposta do AF geradas por caixas acústicas e sintonias.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Da mesma forma que ocorrem alterações na curva de resposta de alto-falantes ao se uti-

lizar caixas acústicas com volumes distintos ou através da sintonização das mesmas ao utilizar transdutores para média e baixa frequência, pode-se alterar a resposta de *drivers* acoplando-se cornetas com geometrias e formatos variados.

Outro recurso utilizado para modificar o formato ou *shape* da curva de resposta é através do recurso chamado de *smoothness* presente no módulo *Transfer Function Response* - (TRF) da Klippel. Com a utilização desta ferramenta, o gráfico gerado é suavizado e há atenuação nos picos e ajustes nos vales da resposta em frequência.

A Figura 2.21 apresenta o resultado gerado após a utilização deste recurso.

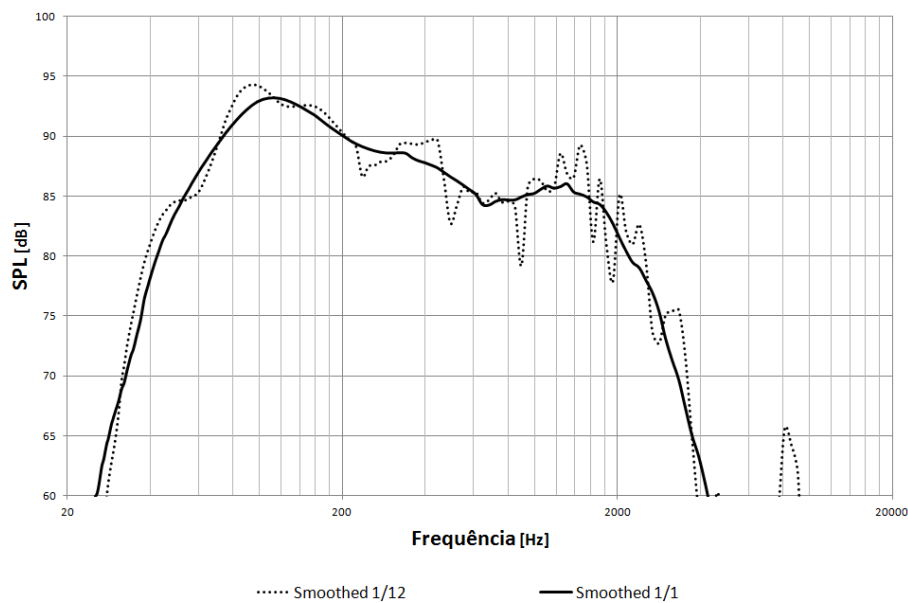


Figura 2.21 – Uso do recurso *smoothness* em uma curva de resposta de alto-falante.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

O processo de suavização (*smoothness*) proposto pelo módulo TRF da Klippel utiliza método da Média Móvel, também conhecido como *Moving average*. Utilizando o exemplo do gráfico da curva de resposta, os valores dos pontos da coordenada horizontal (abscissa) são mantidos e os valores do eixo das ordenadas possuem seus dados processados de acordo com o grau de suavização desejado.

Concluí-se que a aplicação de *smoothness* na curva de resposta, altera significativamente o *shape* e mascara a verdadeira resposta do transdutor. Este recurso é, principalmente, utilizado para alterar os vales e picos encontrados na transição da região D para a E, e mais intensamente na região E.

Outro parâmetro que tem ligação direta com a curva de resposta do alto-falante, é a distorção harmônica. As condições da medição da distorção harmônica são as mesmas que



as da curva de resposta. Na verdade, a curva de resposta é o harmônico fundamental (ou 1º Harmônico) do alto-falante.

A Figura 2.22 apresenta as medições das curvas dos harmônicos: fundamental, 2º e 3º harmônica de um alto-falante típico, classificado como *woofer* de 15”.

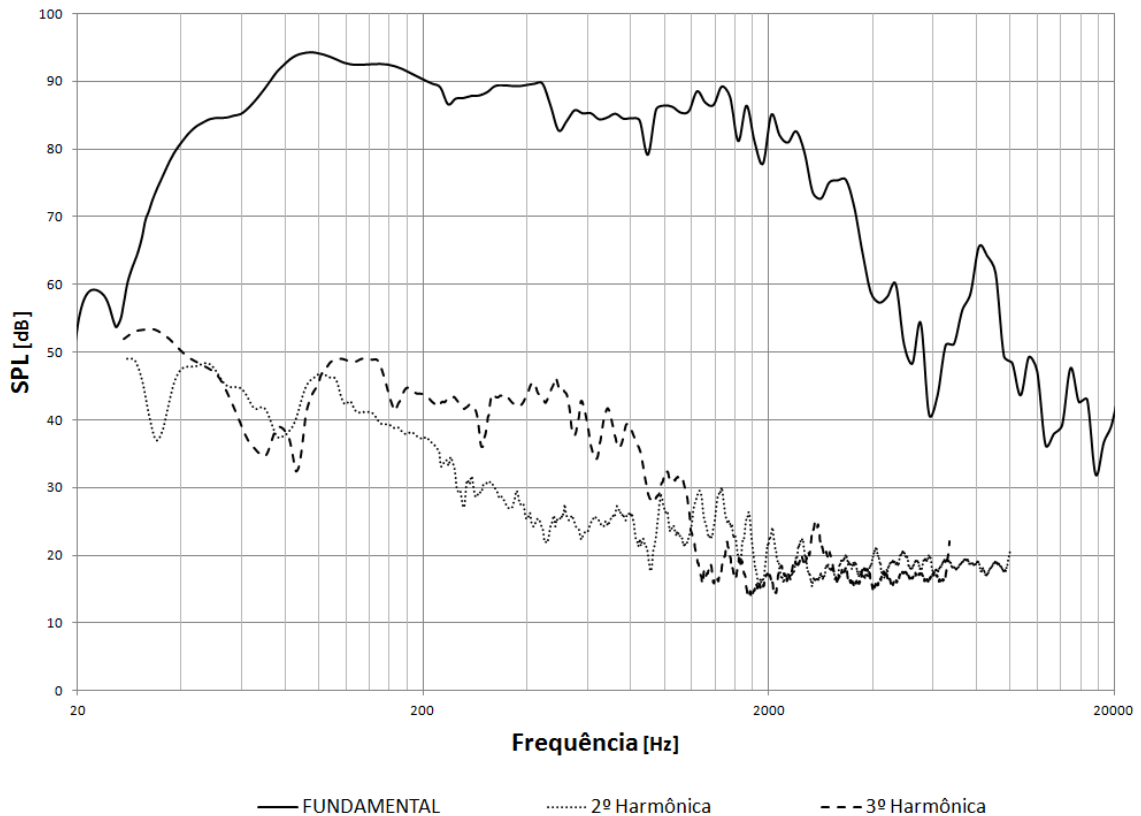


Figura 2.22 – Curva de resposta fundamental, segunda e terceira harmônica de um AF.  
 Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Quando o sinal elétrico alternado é aplicado nos terminais, formam-se ondas sonoras com a mesma frequência do sinal (harmônico fundamental). Porém, por causa das não-linearidades do alto-falante, forma-se a distorção do som, que, por análise de Fourier, pode ser decomposta em harmônicos da frequência fundamental. Os harmônicos superiores são ondas sonoras com frequências múltiplas da frequência fundamental.

Quando se mede a distorção, medem-se, também, as curvas dos outros harmônicos (2º, 3º...nº). A Figura 2.23 apresenta a curva fundamental e a THD do *woofer* apresentado na Figura 2.22.

Para algumas situações onde, a pedido do cliente final, deve-se atender a um valor máximo e determinado, dado em percentual para a distorção harmônica total. Desta forma, a indicação da distorção também é um parâmetro de entrada para a engenharia de produto. A

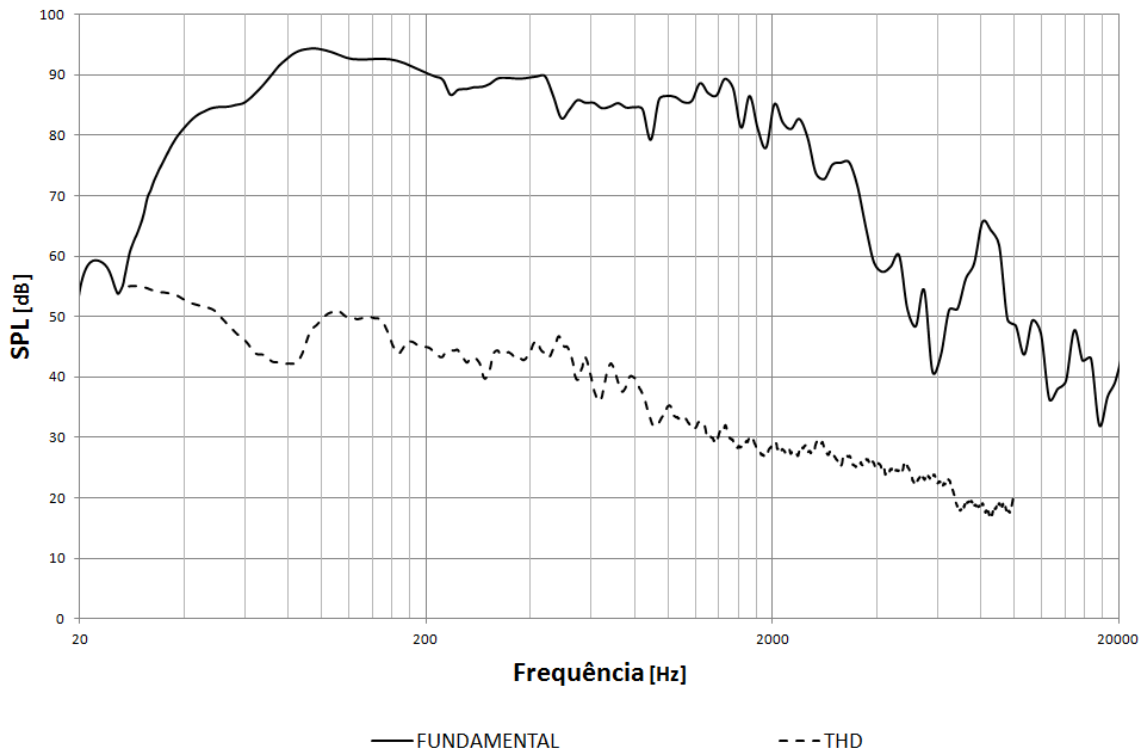


Figura 2.23 – Fundamental e THD de um alto-falante.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Figura 2.24, mostra o gráfico do (*Total Harmonic Distortion*) - (THD) dado em percentual para o mesmo transdutor da Figura 2.23

O valor de THD é encontrado conforme a Equação 2.6,

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + \dots}}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + \dots}} 100, \quad (2.6)$$

onde  $a_n$  = amplitude do n-ésimo harmônico.

A formação de harmônicos que provocam a distorção do alto-falante deve-se às não-linearidades do alto-falante. As principais fontes geradoras destes efeitos são:

- Não-linearidade elástica da suspensão;

O modelamento estabelecido para o alto-falante - oscilador harmônico amortecido e forçado – estabelece que a compliância da “mola” (suspensão) é uma constante. Porém, como pode ser visto na Figura 2.18, a centragem não possui linearidade elástica para grandes deslocamentos. Quando deslocamentos de grande amplitude são realizados pela bobina, a força restauradora deixa de ser uma função linear de  $X$  e torna-se, conforme a Equação 2.7:

$$F = f(x) = (\alpha X + \beta X^3), \quad (2.7)$$

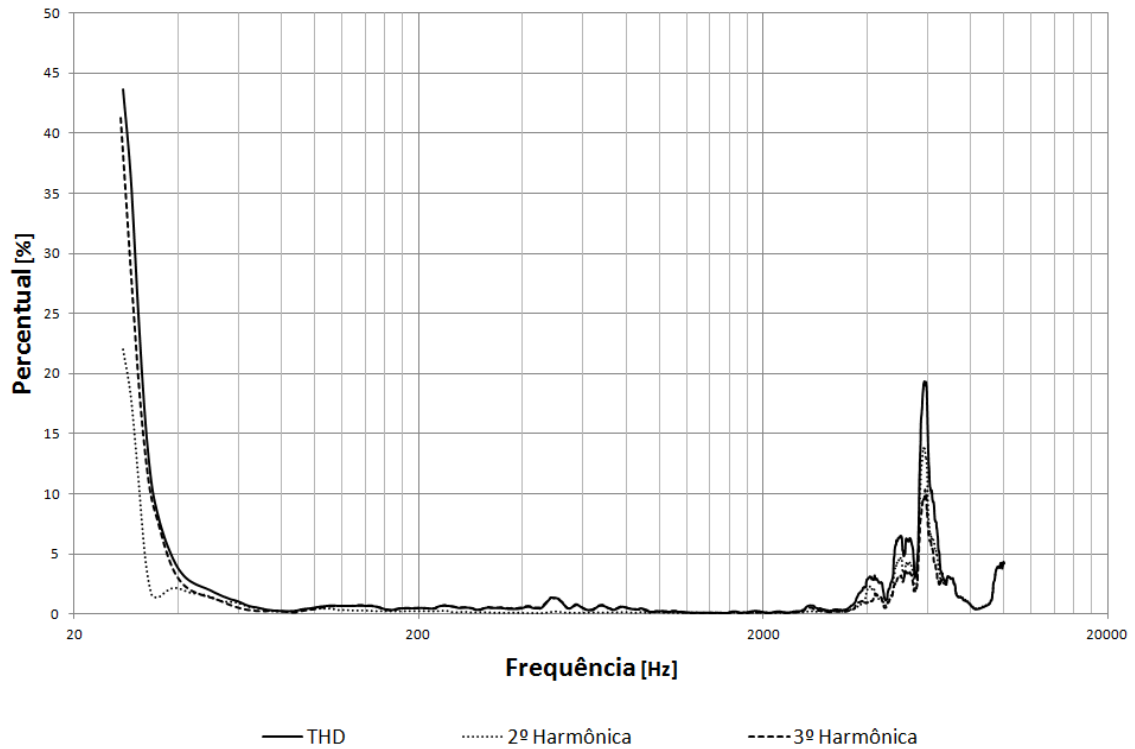


Figura 2.24 – Curva de THD de um AF em percentual.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

onde:  $F$  = força restauradora não linear (para grandes deslocamentos),  $X$  = deslocamento e  $\alpha, \beta$  = constantes  $> 0$ .

A introdução da não-linearidade elástica provoca a formação de um 3º harmônico no movimento da bobina. A Figura 2.25 mostra as formas de onda do sinal elétrico de entrada (esquerda) e a do sinal acústico de saída (direita) do alto-falante.

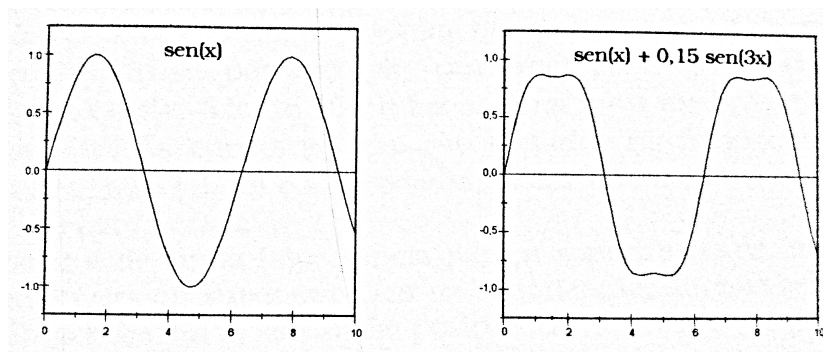


Figura 2.25 – Sinal elétrico de entrada e sinal acústico de saída em um AF.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

A Figura 2.25 à direita, mostra que a onda sonora produzida fica distorcida da sua forma senoidal original. Esse efeito, dependendo da amplitude do 3º harmônico, equivale a 15% da amplitude fundamental, a distorção pode ser audível, prejudicando a reprodução do som pelo

alto-falante.

- Não-linearidade do campo magnético sentido pela bobina.

O modelamento da força eletromagnética aplicada no sistema móvel adota o fator de força  $\beta l$  como constante. Porém, como já foi visto, o campo magnético apresenta um franjeamento acima e abaixo da região delimitada pela espessura da arruela. Devido a este franjeamento, o valor do campo diminui com o afastamento do *gap*. Para grandes deslocamentos, a bobina atinge a região do franjeamento, sentindo os efeitos de um campo variável. Da mesma forma que para o caso da não-linearidade elástica, formam-se, então, harmônicos no movimento da bobina, dependendo da variação do valor do campo magnético. Pelos gráficos da Figura 2.22, percebe-se que as amplitudes dos 2º e 3º harmônicos são maiores para baixa frequência (até 200 Hz). Isso, porque é em baixa frequência que ocorrem os maiores deslocamentos do sistema móvel, ou seja, onde podem ser observadas as não-linearidades (suspensão estendida e bobina na região do franjeamento) do alto-falante. Não existe normatização para o mínimo da THD média para o alto-falante. Os fabricantes adotaram um máximo de 3% para alto-falantes de baixa potência e 10% para alto-falantes de alta potência.

#### 2.2.2.2 Sensibilidade

A sensibilidade, de modo geral, é a média do SPL em um eixo de referência, na resposta de frequência do alto-falante. Ela é medida em dB SPL / 1 W / 1 m, ou seja, a medida deve ser feita com o microfone a 1 metro de distância do alto-falante, com 1 Watt de potência aplicada no transdutor. Esse método de determinação era indicado conforme extinta NBR 5308<sup>1</sup> da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Correspondendo ao nível médio do patamar da região C da curva de resposta da Figura 2.19 ou conforme a indicação da faixa de operação do transdutor pelo fabricante.

Embora, tecnicamente este método apresentado seja o mais plausível, a determinação da sensibilidade do alto-falante também pode ser encontrada com base no respectivo parâmetro de rendimento do transdutor ( $\eta_0$ ). A Equação 2.8, apresenta o meio de se determinar a sensibilidade através do parâmetro ( $\eta_0$ ).

$$L_m = 112,2 + 10\log_{10}(\eta_0). \quad (2.8)$$

Ao se comparar os valores utilizando estes dois métodos, os valores encontrados de

<sup>1</sup> ABNT NBR 5308:1982: Alto-falantes - Medição de características.

sensibilidade dificilmente são iguais. Há, obviamente, uma pequena discrepância, ocasionada, principalmente pela utilização de duas metodologias diferentes. Nas indústrias, são aceitáveis variações de até  $\pm 3\%$  dB de diferença entre o valor de sensibilidade.

Há, também, registros de outros métodos para determinação de sensibilidade, onde alguns fabricantes, baseados na ausência de normativa regulamentadora, consideram como sensibilidade o maior pico apresentado na curva de resposta. Com base na Figura 2.19 este pico de valor de SPL tende a estar localizado na região B, sendo a frequência de ressonância ou um valor muito próximo deste, como indicativo de sensibilidade do transdutor.

As recomendações da *International Electrotechnical Commission* - (IEC) 60268-5<sup>2</sup>, apresentam uma maneira de determinar a sensibilidade e também a resposta de frequência para alto-falantes. Na indústria onde a pesquisa foi realizada, este método estava sendo avaliado para futura implementação nos novos desenvolvimentos de seus transdutores.

Ultimamente tem se utilizado a faixa de operação do transdutor como banda indicativa de sensibilidade. Exemplificando, a média não é feita em toda a resposta de frequência, mas sim, apenas na banda de operação indicada pelo fabricante.

### 2.2.2.3 Impedância nominal

A Impedância nominal é uma medida elétrica do módulo da impedância e de sua fase em função da frequência. Não é necessário utilizar condições de campo livre e nem *baffle*, embora a temperatura ambiente interfira diretamente no ensaio. Na indústria, geralmente tal ensaio é realizado com a temperatura ambiente entre 21 °C e 24 °C.

Existem duas formas de medir a curva de impedância: tensão-constante ou corrente-constante. Nos dois casos, usa-se um gerador de sinais ligado ao amplificador que aplica o sinal (*sweep*) em um circuito formado pelo alto-falante com uma resistência elétrica em série.

Da curva de impedância, pode-se extrair duas especificações técnicas do alto-falante: a frequência de ressonância e a impedância nominal.

#### a) Frequência de Ressonância - $F_s$ :

A frequência de ressonância é aquela onde ocorre o mínimo da impedância mecânica, ou seja, é onde ocorre o pico da curva de impedância elétrica. A frequência de ressonância depende da massa do cone, bobina e da compliância do sistema de suspensão (centragem) do alto-falante. Quanto maior a massa e maior a compliância da centragem, menor a frequência e

<sup>2</sup> IEC 60268-5: *Sound System Equipment – Part 5 Loudspeakers*.

ressonância e vice-versa.

b) Impedância nominal -  $Z_{nom}$ :

Quando se varia a frequência, a impedância do falante cresce, tem um pico e depois cai até um valor mínimo. Este valor mínimo depois do pico será a impedância nominal do falante, conforme extinta NBR 5308<sup>3</sup>. O valor da impedância nominal dos alto-falantes está normatizado, também pela extinta NBR 5254<sup>4</sup>, em: 2, 4, 6, 8, 16, 25, 50, 100, 400, 800, em função do valor da impedância de saída dos amplificadores. Deve-se arredondar o valor obtido da curva de impedância, por exemplo: 6,75 Ohm dará uma impedância nominal de 8 Ohm.

A Figura 2.26 mostra uma curva de impedância típica de um *woofer*. Ao analisar essa curva, nota-se que, a impedância varia bastante em toda a faixa de frequência. No início, ela tem um pico, cai a um valor mínimo e depois inicia uma curva ascendente, que depende da indutância da bobina. O pico da impedância elétrica equivale ao valor mínimo da impedância mecânica.

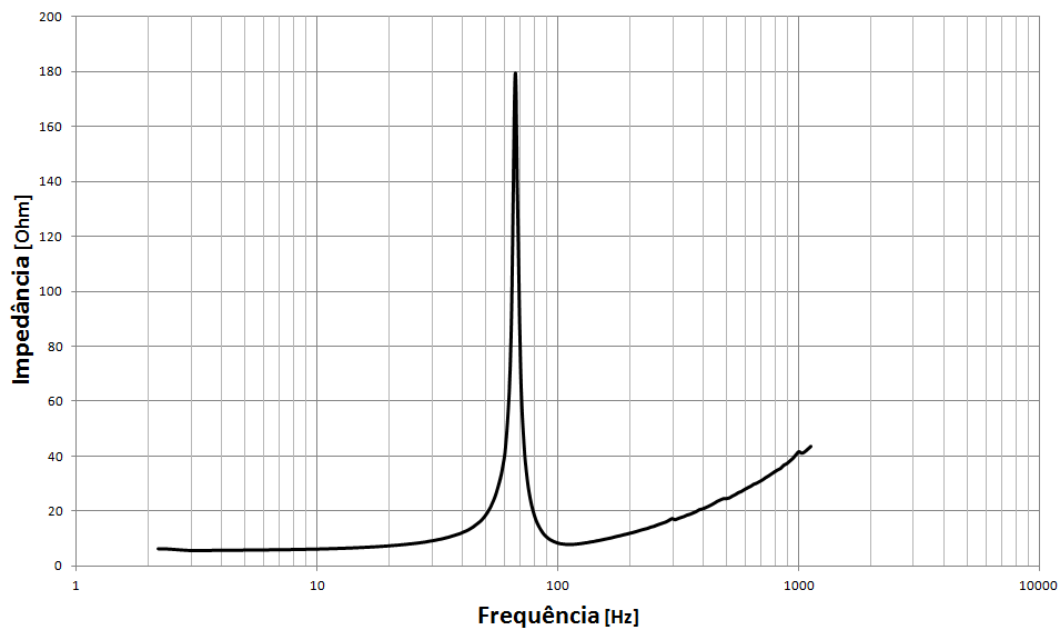


Figura 2.26 – Curva de Impedância típica de um *woofer*.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Com a análise da Figura 2.26 que representa uma característica curva de impedância de um *woofer* com impedância nominal ( $Z_{nom}$ ) de  $8\Omega$ , é possível identificar a frequência de ressonância deste transdutor ( $F_s$ ) que, nesse caso, assume o valor de aproximadamente 65 Hz. Imediatamente após o  $F_s$ , no menor valor assumido pela curva, é encontrado o valor de impedância

<sup>3</sup> ABNT NBR 5308:1982: Alto-falantes - Medição de características.

<sup>4</sup> ABNT NBR 5254:1982: Alto-falante - Impedâncias nominais.

nominal, nesta imagem indicando um valor de  $8,5 \Omega$ . Na prática a varredura de frequência ou *sweep* aplicada ao transdutor para obtenção da curva de impedância inicia próximo dos 20 Hz e na maior parte dos casos, tem seu término próximo a 10 kHz. Essa estreita faixa de varredura é justificada porque as informações relevantes ( $F_s$  e  $Z_{nom}$ ) para o transdutor estão aqui localizadas.

Embora as normas brasileiras específicas para alto-falantes tenham sido descontinuadas, alguns fabricantes ainda seguem e conservam as diretrizes apresentadas por esses regimentos. Há outra situação, no caso de produtos para exportação, onde se aplica a legislação internacional durante o desenvolvimento do transdutor. A norma IEC 60268-5<sup>5</sup>, específica para alto-falantes, em seu item 16.2 aborda a metodologia para determinação da Impedância Nominal.

#### 2.2.2.4 Potência elétrica

Outro tipo de caracterização é a potência elétrica eficaz máxima que o alto-falante suporta. O teste era normatizado pela também extinta NBR 10303<sup>6</sup>. Embora a norma esteja “descontinuada”, muitos fabricantes ainda mantêm esse regulamento como referência.

A indicação da NBR 10303 solicita que se deve aplicar um ruído rosa (filtrado em baixas e altas frequências) no alto-falante e monitorar a tensão RMS aplicada através de um voltímetro. O teste tem duração de duas horas ininterruptas, onde a tensão aplicada no alto-falante segue a Equação 2.9:

$$V_{rms} = \sqrt{P_{rms} \times Z_{nom}}, \quad (2.9)$$

onde:  $V_{rms}$  é a tensão elétrica em  $V$  que deve ser aplicada nos terminais do falante,  $P_{rms}$  é a potência elétrica projetada conforme características da bobina e  $Z_{nom}$  é a impedância nominal do alto-falante. Após a realização do ensaio, o transdutor não deve apresentar danos em seus componentes e por consequência, deve ter a mesma resposta em frequência apresentada antes da realização deste ensaio.

A unidade de potência empregada em alto-falantes usualmente é apresentada em Wrms. Embora o termo rms seja muito questionado quando aplicado em alto-falantes (Silva [45]), ainda permanece como uma especificação técnica na grande maioria dos fabricantes e catálogos técnicos.

Atualmente há fabricantes que estão adotando o termo Potência Nominal e Potência de

<sup>5</sup> IEC 60268-5 *Sound system equipment - Part 5: Loudspeakers*.

<sup>6</sup> ABNT NBR 10303:1988: Alto-falantes - Comprovação de potência elétrica admissível - Método de ensaio.

Pico para indicar quais valores atribuir em seus respectivos produtos, uma sendo o dobro da outra respectivamente. Essa utilização vem sendo empregada para facilitar a interpretação e a aplicação junto aos amplificadores de potência. É comum também em situações onde se utiliza o termo Potência Nominal, aparecer notas no próprio folheto técnico do alto-falante que indicam que o valor da potência rms do amplificador deve ser o mesmo valor da potência nominal do transdutor em questão.

Esse valor de potência apresentado em folhetos e manuais dos transdutores indica qual a potência máxima que aplicada pelo amplificador o alto-falante deve suportar. Porém, como foi descrito, apenas uma parte bem pequena desta potência é transformada efetivamente em som. Um bom alto-falante não deve apenas suportar uma potência elétrica alta, mas também, conseguir transformar eficazmente esta potência em *potência sonora*, ou seja, possuir alta eficiência ( $\eta_0$ ) ou alta sensibilidade. Para aumentar 3 dB na intensidade sonora, deve-se dobrar a potência elétrica aplicada.

A ausência de legislação brasileira, específica para alto-falantes, para reger e impor as diretrizes que devem ser seguidas, permitem que os fabricantes acabem adotando critérios próprios para indicar e determinar os parâmetros de seus transdutores.

#### 2.2.2.5 Parâmetros de pequenos sinais

O cálculo dos parâmetros Thiele-Small (TS) foi proposto por A. N. Thiele e R. H. Small em trabalhos publicados durante a década de 1970. Estes trabalhos visavam o projeto da caixa acústica tipo aberta (*vented box*), do que, até então, não se tinha um domínio teórico. Os parâmetros foram calculados com base na analogia entre circuitos elétricos das partes mecânicas e acústicas do alto-falante. Estes parâmetros são derivados dos parâmetros tradicionais do alto-falante. Atualmente, os parâmetros de TS são utilizados para projetos de alto-falantes e de caixas acústicas.

Transdutores eletro-acústicos de radiação sonora (*woofers*, *tweeters*, fones de ouvido, *micro-speakers*, entre outros) podem ser descritos por características quase independentes das propriedades do sinal de entrada. Tais características são a frequência de ressonância, fator de perda e outros parâmetros denominados de parâmetros lineares Thiele-Small. Estes parâmetros são, correspondentes a um circuito elétrico equivalente, que engloba as impedâncias elétricas da bobina, as impedâncias mecânicas dos elementos móveis e suspensões, as impedâncias acústicas ligadas aos elementos móveis, e os fatores de conversão de energia eletro-mecânica e



mecânico-acústica.

Na confecção do circuito eletroacústico equivalente é usada a premissa de parâmetros concentrados e, dessa forma, massa rigidez e amortecimento se encontram concentrados em elementos chave do sistema e não distribuídos (caso mais realista). Dessa forma, realidades como os modos vibracionais do diafragma flexível não são contemplados por este modelo matemático.

Segundo Klippel [22] os parâmetros de TS estão encontrados entre as grandezas elétricas e mecânicas do alto-falante. A Figura 2.27 ilustra a disposição dos parâmetros de um alto-falante.

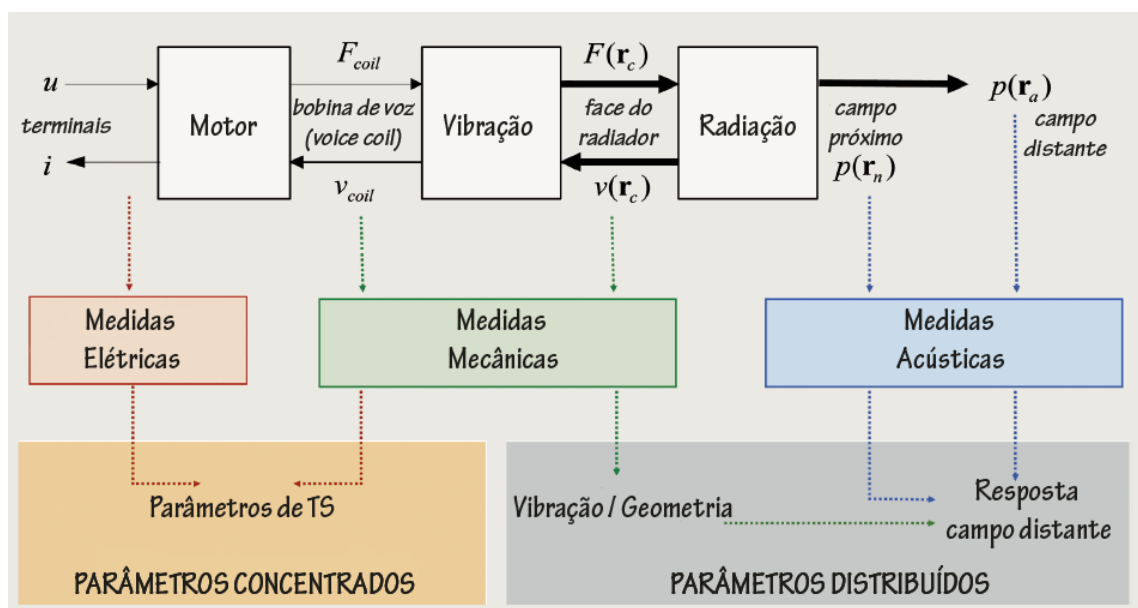


Figura 2.27 – Parâmetros de um alto-falante.

Fonte: (Klippel [22], 2009)

Tanto os parâmetros tradicionais, quanto os parâmetros TS são obtidos através de medições elétricas da impedância do alto-falante. O método mais tradicional é utilizar duas curvas de impedância: uma medida de forma tradicional e outra com uma massa conhecida agregada no diafragma, que fará a frequência de ressonância se deslocar para valores menores. Comparando-se as duas curvas e conhecendo o valor da resistência elétrica da bobina e área efetiva do diafragma, pode-se calcular todos os parâmetros.

Outro modo de medição utiliza a curva de impedância e a curva de velocidade do diafragma  $x$  frequência. Este método requer o uso de um acelerômetro ou outro método interferométrico com laser capaz de medir a velocidade do diafragma. A utilização dos valores da impedância e velocidade permite calcular os parâmetros. Porém, os cálculos em ambos os

métodos, só valem para medições feitas com pequenos sinais aplicados e em baixas frequências.

Dentre os parâmetros de pequenos sinais, eles são classificados como: Parâmetros Elétricos, Parâmetros Mecânicos, Fatores de Perdas e Parâmetros Diversos.

Os parâmetros elétricos e suas unidades são:

$R_e$  - Resistência elétrica da bobina em um sinal DC, em [ $\Omega$ ];

$C_{mes}$  - Capacitância elétrica, em [ $\mu$  F];

$L_{ces}$  - Indutância elétrica, em [m H];

$R_{es}$  - Resistência elétrica devido às perdas mecânicas em [ $\Omega$ ];

$F_s$  - Frequência de ressonância, em [Hz].

Os parâmetros mecânicos:

$M_{ms}$  - Massa mecânica total com a carga de ar e bobina, em [g];

$M_{md}(Sd)$  - Massa mecânica sem a carga de ar, em [g];

$R_{ms}(Sd)$  - Resistência mecânica das perdas totais do driver, em [kg/s];

$C_{ms}$  - Compliância Mecânica total, em [mm/N];

$K_{ms}$  - Rigidez mecânica da suspensão, em [N/mm];

$\beta l$  - Fator de Força, em [Tm];

Lambda  $S$  ( $\lambda$ ) - Fator de deformação Suspensão.

Os fatores de perda:

$Q_{tp}$  - Total de fator Q, considerando todas as perdas;

$Q_{ms}$  - Fator de qualidade mecânico;

$Q_{es}$  - Fator de qualidade elétrico;

$Q_{ts}$  - Fator de qualidade total.

Parâmetros diversos:

$V_{as}$  - Volume acústico equivalente, em [l];

$\eta_0$  - Eficiência, em [%];

$L_m$  - Nível de pressão sonora (1 Watt a 1 metro), em [dB SPL];

$S_d$  - Área efetiva do diafragma, em [cm<sup>2</sup>];

Cada um dos parâmetros pode ser analisado e feitas suas ligações com os componentes e funcionamento do alto-falante. Os parâmetros TS podem ser calculados em função dos parâmetros elétricos e mecânicos.

a) Massa mecânica Total ( $M_{ms}$ )

O parâmetro  $M_{ms}$  refere-se à massa do sistema móvel (diafragma, bobina e suspensão)

e a massa de ar equivalente à impedância acústica. No caso das medições serem do tipo “*free air*” (sem uso do baffle infinito), tem-se conforme a equação 2.10 :

$$M_{ms} = M_{md} + M_{ma}, \quad (2.10)$$

onde,  $M_{md}$  é a massa do sistema móvel,  $M_{ma}$  é a massa acústica.

Porém, tanto os parâmetros elétricos e mecânicos, quanto os parâmetros TS são obtidos, geralmente, através de medições do tipo *free air*, onde as ondas sonoras emitidas pelas partes frontal e posterior do diafragma interferem, e, portanto, a  $M_{ms}$  é descrita pela equação 2.10.

$M_{ms}$  é um parâmetro obtido da curva de impedância, ou seja, ele é um parâmetro dinâmico e não estático. O valor da massa estática dos componentes do sistema móvel, por exemplo, não será o exato de  $M_{md}$ , mas sim, aproximado. A impedância do transdutor varia de acordo com a frequência, por isto tal diferença.  $M_{ms}$ , no modelamento do alto-falante como oscilador harmônico amortecido e força, funciona como a massa  $M$ .

#### b) Compliância mecânica total ( $C_{ms}$ )

A compliância mecânica total corresponde à compliância da suspensão e aranha. No modelamento do oscilador harmônico, ela corresponde a compliância  $C$  da mola. Assim como a massa mecânica,  $C_{ms}$  é um parâmetro dinâmico. Pode-se medir estaticamente a compliância da centragem e da borda e calcular a compliância total da suspensão, porém, este valor não corresponde exatamente ao valor de  $C_{ms}$ . As principais causas para estas diferenças encontradas são: o cone do alto-falante (AF) contribui para a rigidez do sistema como um todo e esta variação é afetada pela frequência, já a rigidez da suspensão também tende a sofrer alterações com a frequência.

#### c) Resistência Mecânica ( $R_{ms}$ )

É a resistência mecânica da suspensão. No oscilador harmônico, corresponde à resistência de amortecimento do movimento,  $R$ . O parâmetro  $R_{ms}$  está relacionado ao transiente do alto-falante, ou seja, ao tempo necessário para atingir o regime estacionário de seu movimento. Este parâmetro está relacionado ao amortecimento do movimento, ou seja, parte da energia mecânica de oscilação do alto-falante é transformada em calor pela resistência mecânica.

#### d) Área efetiva do diafragma ( $S_d$ )

Corresponde a área projetada do diafragma, como se ele fosse um pistão. Seu valor é calculado com a Equação 2.11:

$$S_d = \pi r_d^2, \quad (2.11)$$

onde,  $r_d$  é o raio da base efetiva do cone (do seu eixo até metade da suspensão).

e) Resistência Elétrica ( $R_e$ )

É a resistência elétrica da bobina. Não é calculada pela curva de impedância. Seu valor deve ser medido antes através de um ohmímetro, e incluído para o cálculo dos parâmetros de TS.

f) Fator de força ( $\beta l$ )

É calculado da curva de impedância corresponde ao produto do campo magnético no *gap* e o comprimento do fio da bobina imerso no campo. Também é um parâmetro dinâmico. O fator de força é de suma importância, já que junto com a corrente elétrica alternada, é responsável pela movimentação do sistema móvel.

g) Frequência de ressonância ( $f_s$ ) - considerada parâmetro de TS

A frequência de ressonância é aquela já descrita anteriormente. Ela é calculada pela Equação 2.12,

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms}C_{ms}}} = \frac{\omega_s}{2\pi}, \quad (2.12)$$

onde,  $\omega_s$  = frequência angular de ressonância, deve-se alterar a compliância da suspensão ou a massa do sistema móvel.

h) Volume acústico Equivalente ( $V_{as}$ )- considerado parâmetro de TS

Corresponde ao volume de ar que teria a mesma compliância acústica que a suspensão do alto-falante, e é calculado através da Equação 2.13,

$$V_{as} = \rho_0 c^2 C_{ms} S_d^2, \quad (2.13)$$

onde,  $\rho_0$  é a densidade do ar e  $c$  é a velocidade do som no ar, em condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

O volume acústico equivalente é um dos parâmetros mais utilizados para o cálculo de caixas acústicas.

i) Fator qualidade mecânico ( $Q_{ms}$ ) - considerado parâmetro de TS

O fator de qualidade mecânico pode ser calculado através dos parâmetros mecânicos tradicionais, conforme Equação 2.14

$$Q_{ms} = \frac{M_{ms}\omega_s}{R_{ms}} = \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \frac{1}{R_{ms}}. \quad (2.14)$$

j) Fator qualidade elétrico ( $Q_{es}$ ) - considerado parâmetro de TS

Analogamente ao fator de qualidade mecânico, pode-se calcular o elétrico. Tem-se a Equação 2.15

$$Q_{es} = \frac{M_{ms}\omega_s R_e}{(\beta l)^2} = \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \frac{R_e}{(\beta l)^2}. \quad (2.15)$$

k) Fator qualidade total ( $Q_{ts}$ ) - considerado parâmetro de TS

Para calcular os efeitos totais das perdas (elétricas e mecânicas), calcula-se o fator qualidade total em Equação 2.16:

$$\frac{1}{Q_{ts}} = \frac{1}{Q_{ms}} + \frac{1}{Q_{es}}, \quad (2.16)$$

substituindo 2.14 e 2.15 em 2.16 tem-se a Equação 2.17:

$$Q_{ts} = \left( \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \right) \left( \frac{R_e}{(\beta l)^2 + R_e R_{ms}} \right). \quad (2.17)$$

O fator qualidade total também é de suma importância para o cálculo de caixas acústicas. Conforme apresentado sobre curva de resposta do alto-falante, a região inicial na curva de resposta (até a frequência de ressonância) é fortemente influenciada pelo valor de  $Q_{ts}$ . Da mesma forma, a região inicial da curva de resposta da caixa acústica também será influenciada pelo fator de qualidade total.

l) Eficiência ( $\eta_0$ ) e Sensibilidade ( $Sens$ ) - considerados parâmetro de TS

A eficiência é a razão entre a potência acústica irradiada pela potência elétrica aplicada no alto-falante (na ressonância). Este valor, tradicionalmente é apresentado em um valor percentual, onde quanto maior a eficiência, melhor o alto-falante enquanto transdutor. O valor da eficiência em termos dos parâmetros tradicionais é (em valor percentual) conforme a Equação 2.18

$$\eta_0 = \frac{\rho_0 S_d^2 (\beta l)^2}{2\pi c M_{ms}^2 R_e} 100. \quad (2.18)$$

Outra forma de mostrar a eficiência é através da sensibilidade. Esta última corresponde à média do SPL na faixa de frequência onde o alto-falante responde, e é dada em dB SPL / 1W / 1m. Pode-se calcular a sensibilidade em termos da eficiência, onde  $\eta_0$ , conforme Equação 2.19

$$\eta_0 = \frac{P_{as}}{P_{er}} = \frac{I^2 \pi r^2}{P_{er}}. \quad (2.19)$$

Como a sensibilidade é dada para  $P_{er}=1\text{Watt}$ , medida a 1 metro ( $r=1$ ), tem-se a Equação 2.20,

$$P_{ef}^2 = \rho c \frac{\eta_0}{2\pi}. \quad (2.20)$$

Logo, para calcular o nível de pressão sonora (*SPL*), tem-se a Equação 2.21

$$\text{SPL} = 10\log \frac{P_{ef}^2}{P_{0ef}^2} = 10\log \frac{\rho c \frac{\eta_0}{2\pi}}{(2 \cdot 10^{-12})^2}. \quad (2.21)$$

Portanto, a sensibilidade (*SPL* a 1W e a 1 metro) será, conforme a Equação 2.22

$$\text{Sens} = 10\log \left( \frac{\eta_0}{2\pi \cdot 10^{-12}} \right) = 112 + 10\log \left( \frac{\rho_0 S_d^2 (\beta l)^2}{2\pi c M_{ms}^2 R_e} \right). \quad (2.22)$$

Analisando as equações acima, percebe-se que para aumentar a eficiência (e sensibilidade do alto-falante) deve-se:

- Diminuir a massa do sistema móvel, e/ou
- Diminuir a resistência elétrica da bobina, e/ou
- Aumentar o campo magnético no *gap* ou o comprimento do fio da bobina imerso nele, e/ou
- Aumentar a área efetiva do diafragma

A sensibilidade, enquanto especificação técnica, é medida através da curva de resposta como foi citado. O seu cálculo através dos parâmetros Thiele-Small se aproxima bem do valor obtido pela curva de resposta.

Os parâmetros TS estão associados a um modelo aproximado, é válido para pequenos sinais e baixa frequência. Para projetos de *woofers*, ele fornece uma simulação razoável, que permite prever o resultado sonoro obtido. Porém, quando se trata de grandes sinais, este modelamento não pode prever problemas no funcionamento do alto-falante, mais especificamente, informações sobre distorção e compressão de potência. Além disso, está restrito a *woofers*, não sendo útil em alto-falantes de média-alta frequência. Apesar disso, os parâmetros Thiele-Small vem auxiliando muito os fabricantes de alto-falantes, mesmo sendo baseados em um método aproximado, principalmente, no que se refere ao cálculo de caixas acústicas.

### 2.2.3 Caracterização dos materiais

Os modelos computacionais usados para prever o comportamento dinâmico dos alto-falantes tem como parte dos dados de entrada as propriedades mecânicas dos materiais que

compõem as partes móveis do alto-falante. Muitas vezes, então, é necessário medir as propriedades dinâmicas de materiais, tais como o fator de perda e o módulo de elasticidade, a fim de fornecer dados válidos para análise numérica de estruturas. Este é, especialmente, o caso quando estruturas com tratamentos de amortecimento devem ser otimizadas ou simuladas. Materiais viscoelásticos são amplamente utilizadas para fins de tratamento de amortecimento, a fim de reduzir a amplitude dos modos vibracionais do diafragma do alto-falante em muitas aplicações. Por isso, várias técnicas experimentais têm sido desenvolvidas para a estimativa destas propriedades. Dentre essas técnicas, o método da viga de Oberst, indicado na norma da *American Society for Testing and Materials* - (ASTM) e756-93 é um dos métodos de teste padrão para medir propriedades dinâmicas de materiais (Erdogan e Bayraktar [16]).

Devido às inúmeras opções de *softwares* para modelagem multi-física do alto-falante com o método dos elementos finitos, a quantidade de informação sobre cada material que é inserido na ferramenta para realização das interações, também pode variar entre *softwares* diferentes. Obviamente, quanto mais informações se obtiver do material em estudo, mais preciso tende a ser o resultado encontrado pelo modelo computacional. Além disso, as propriedades dos materiais podem variar drasticamente em função dos processos de fabricação e das matérias-primas locais. Assim, o uso de bancos de dados proprietários, geralmente criados na Europa e Estados Unidos da América (EUA), não é uma saída precisa para a realidade brasileira. Finalmente, a criação de bibliotecas completas com grande número de parâmetros caracterizados facilitam, também, a utilização e migração para outros *softwares* de simulação.

Os parâmetros fundamentais para utilização de ferramentas de simulação de estruturas são: módulo de elasticidade ou módulo de Young, Fator de Perda (amortecimento estrutural), coeficiente de Poisson e densidade.

### 2.2.3.1 Módulo de Young e fator de perda

De acordo com Erdogan e Bayraktar [16] o módulo de elasticidade é uma propriedade bem conhecida, que define a relação entre tensão e deformação. A medição do módulo de elasticidade usando o método do feixe Oberst baseia-se na solução de análise vibracional de uma viga engastada. Em primeiro lugar, de acordo com a teoria de feixe de Bernoulli-Euler, frequências naturais de uma viga homogênea em flexões vibrantes são dadas na Equação 2.23,

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}, \quad (2.23)$$

em que  $L$  é o comprimento livre da viga,  $E$  é o módulo de elasticidade do material,  $I$  é o momento de inércia da viga,  $m$  é a massa por unidade de comprimento e  $\beta_n L$  são os valores constantes, que são fornecidos para os primeiros cinco modos de flexão na Tabela 2.4.

Substituindo o valor do momento de inércia e  $\beta_n L$  para um dado modo vibracional da viga é possível calcular o módulo de Young em função da frequência natural deste modo,

$$E = \frac{12\rho L^4 f_n^2}{H^2 C_n^2}, \quad (2.24)$$

onde  $\rho$  é a densidade do material,  $H$  representa a espessura da viga,  $f_n$  é a frequência natural em Hz e  $C_n$  são as constantes que podem ser calculados a partir de:

$$C_n = \frac{(\beta_n L)^2}{2\pi}, \quad (2.25)$$

com valores listados na Tabela 2.4 para os primeiros cinco modos.

Tabela 2.4 – Constantes para os cinco primeiros modos de vibração.

Modos ( $n^o$ )	$\beta_n L$	$C_n$
1	1,875	0,560
2	4,694	3,507
3	7,855	9,820
4	10,996	19,242
5	14,137	31,809

Fonte: (Erdogane bayraktar [16], 2003)

Dessa forma, ao medir a frequência de um dado modo vibracional da viga é possível calcular o módulo de elasticidade da mesma. Uma maneira de medir o Módulo de Young e o fator de perda é através do módulo *Material Parameter Measurement* - (MPM), da Klippel GmbH.

A técnica de medição utilizada por este método de caracterização das propriedades mecânicas, proposto pelo MPM, é baseada na medição do primeiro modo de vibração de uma viga engastada em apenas um lado. Os parâmetros são válidos para a condição da Equação 2.26,

$$E = 2000[\text{Mpa}] @ F_{\text{viga}} = 90[\text{Hz}], \quad (2.26)$$

onde:

$E$ : Módulo de Young em Mpa, na frequência  $F_{\text{viga}}$ .

$F_{\text{viga}}$ : Frequência de vibração da viga sob ensaio em Hz



Para levantamento das propriedades mecânicas dos materiais, deve-se ajustar o comprimento da amostra engastado no ensaio para obter uma frequência de vibração  $F_{\text{viga}}$  e módulo de Young  $E$  de acordo com a condição da Equação 2.26.

Os valores de medição do módulo de elasticidade  $E$  e o fator de perda  $\eta$  depende da seguinte condição de medição: a vibração do feixe sob ensaio torna-se não linear em grandes amplitudes de vibração.

Basicamente, há duas razões para este comportamento:

- Primeiro, o deslocamento de pico não é desprezível em comparação com o comprimento da viga e as alterações da geometria durante um ciclo de vibração;
- Em segundo lugar, o fator de perda  $\eta$  e o módulo  $E$  baseia-se em um modelo linear, mas as propriedades reais dos materiais se comportam de forma não-linear em maiores amplitudes de estresse e tensão. Portanto, o método é aconselhável para operações do feixe em baixa amplitudes (<0,2 mm), onde as não-linearidades são desprezíveis.

Para comparar materiais diferentes, recomenda-se ajustar o comprimento da amostra fixada, de tal maneira a obter uma frequência de ressonância semelhante em ambas medições realizadas. Para alterar a frequência de ressonância da amostra, pode-se alterar o comprimento da viga.

A Figura 2.28 apresenta os valores do módulo de Young  $E$  e do fator de perda  $\eta$  para o comportamento de alguns materiais e suas respectivas dependência da frequência.

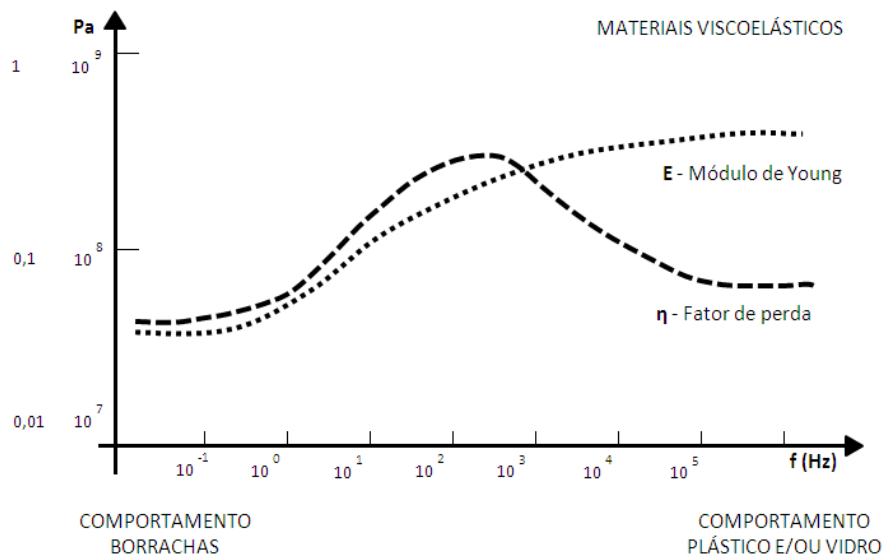


Figura 2.28 – Dependência com a frequência.

Fonte: (Klippel [22], 2009)

Ao aumentar o comprimento da viga, a frequência de ressonância da amostra de um

mesmo material, tente a diminuir. Portanto, ao diminuir o comprimento da viga, é possível elevar o valor de frequência de ressonância da amostra de um mesmo material.

As propriedades dos materiais não dependem apenas da frequência, mas também, da temperatura ambiente. A Figura 2.29 apresenta o comportamento do módulo de Young  $E$  e do fator de perda  $\eta$  ao longo da variação da temperatura.

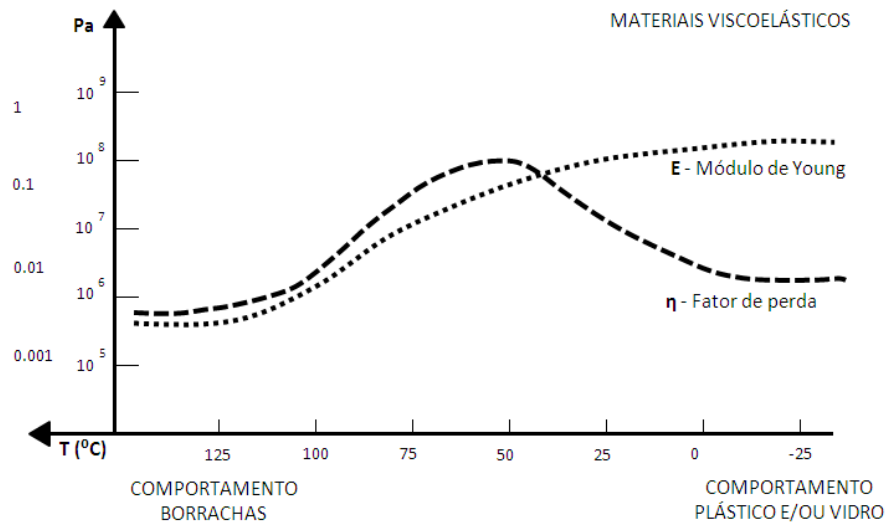


Figura 2.29 – Dependência com a temperatura.

Fonte: (Klippel [22], 2009)

Alguns materiais mostram uma semelhança na dependência de  $E$  e  $\eta$  em função da temperatura e da frequência. Por exemplo, materiais viscoelásticos possuem comportamento irregular em alta frequência e comportamento mais sensível em baixas frequências.

Há a observação da umidade em papel e tecidos, onde estes possuem, também, uma elevada dependência da umidade do ar. Essas condições devem ser controladas ou, pelo menos, medidas e registradas juntamente com os resultados da medição.

### Método de Medição - MPM

O método proposto, baseia-se no princípio da viga vibrante, onde uma viga com dimensões conhecidas sofre uma excitação, também conhecida. A viga em movimento, dependendo de suas propriedades mecânicas, apresenta uma resposta característica. A Figura 2.30 apresenta o instrumental necessário para a medição e introduz os conceitos do método.

A viga é excitada através da variação da pressão sonora no interior da cavidade, imposta pelo movimento do alto-falante, que vibra através de uma varredura de senoidal. Durante a execução do sinal senoidal pelo alto-falante, a pressão sonora  $P(f)$  e a excursão  $X(f)$  estão sendo mensuradas simultaneamente. O deslocamento  $X(f)$  é obtido a partir de um sensor de

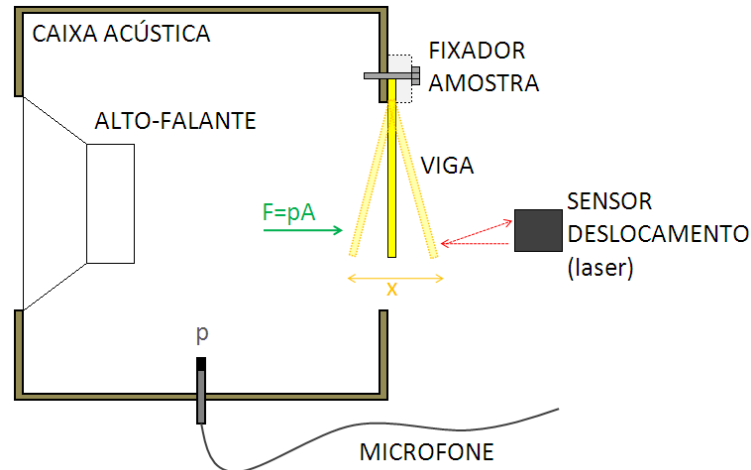


Figura 2.30 – Dispositivo para caracterização das propriedades mecânicas dos materiais.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

deslocamento *laser*, o qual é montado diretamente na caixa de teste para minimizar a vibração, o alinhamento e outros erros. A pressão sonora é medida com um microfone, que está montado na bancada de medição. Ambos os sinais gerados e recebidos, são processados por um microcomputador e, assim, o resultado final é apresentado ao usuário via *software* específico.

### Modelo Acústico do instrumento de medição

Em baixas frequências, o instrumento de medição pode ser modelado pela técnica dos parâmetros concentrados (*Lumped Parameter*) conforme apresentado na Figura 2.31,

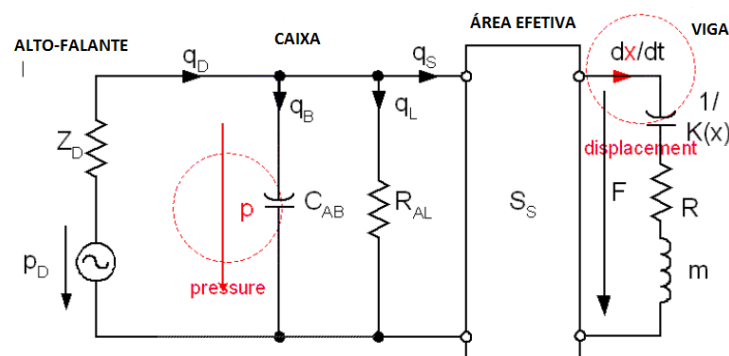


Figura 2.31 – Modelo acústico do módulo de medição de propriedades mecânicas dos materiais - MPM.

Fonte: (Klippel [22], 2009)

O alto-falante em funcionamento, gera uma velocidade de volume de ar  $q_D$ , conforme Equação 2.27,

$$q_D = q_B + q_L + q_S, \quad (2.27)$$

onde a velocidade do volume  $q_B$  flui para dentro do volume da caixa,  $q_L$  deixa a caixa através do furo existente na amostra, e a velocidade do volume  $q_S$  produz a força  $F$  para excitar o feixe da amostra em teste. A pressão  $p$  na caixa gera a força  $F = S_S p$  na amostra usando a área efetiva  $S_s$ . A compliância acústica  $C_{AB}$  depende do volume de ar interno  $V$  e da pressão estática do ar  $p_0$ .

O alto-falante utilizado para a excitação pneumática é modelado pela impedância acústica  $Z_D$  e a fonte de pressão  $p_D$ . A viga engastada que está sob ensaio, é descrita pelo circuito equivalente utilizando elementos concentrados. A força motriz é apresentada na Equação 2.28,

$$F = pS_s = K(x)x + R(x, v)\frac{dx}{dt} + m\frac{d^2x}{dt^2}, \quad (2.28)$$

é a soma da força de restauração  $Kx$ , a força  $Rdx/dt$  supera as perdas internas do material e a inércia de aceleração da massa  $m$ .

A medição do deslocamento  $x$  é baseada no princípio da triangulação e a ferramenta para verificação deste movimento é o sensor do tipo *laser*. A pressão sonora dentro da caixa acústica pode ser medida utilizando um microfone típico de medições acústicas. Entretanto, a força motriz  $F = S_S p$  não pode ser calculada em valores absolutos para medida de pressão sonora  $p$ , pois a efetiva area  $S_S$  da suspensão não é usualmente conhecida.

Com a medição da função de transferência entre os sinais de deslocamento e pressão sonora, é possível encontrar a frequência de ressonância e calcular o módulo de elasticidade e o fator de perda, a Figura 2.32 apresenta a função de transferência da medição de uma amostra e os pontos utilizados para encontrar o  $\eta$ .

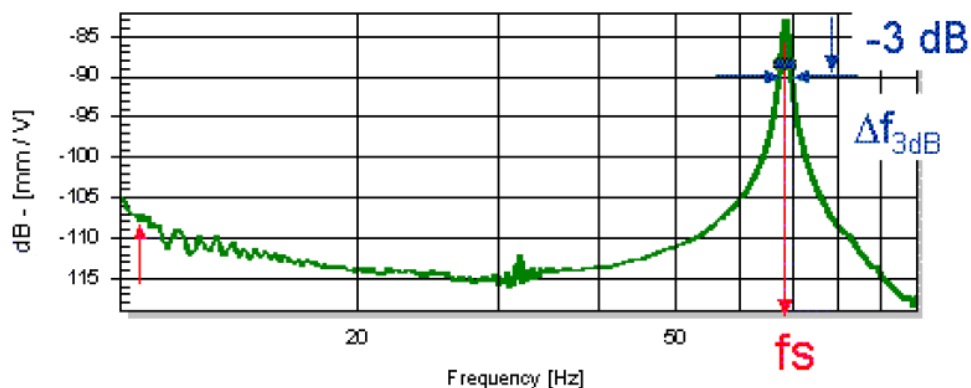


Figura 2.32 – Função de transferência do corpo de prova.

Fonte: (Klippel [22], 2009)

O *software* que acompanha o dispositivo calcula a função de transferência  $H(f) =$

$X(t)/P(f)$ , que é usada para determinar as frequências de ressonância  $F_s$  e a largura de banda de 3 dB.

O fator de perda  $\eta$ , também variável com a frequência, pode ser determinado pelo método da banda de meia potência (Klippel [23]). Este método consiste em medir a razão entre largura de banda de meia potência pela frequência natural de um dado modo. A largura de banda de meia potência é a diferença entre as frequências superior e inferior à frequência do modo em que a magnitude da função resposta em frequência (FRF) da viga decai de 3 dB. Esta medida está ilustrada na Figura 2.29, e dessa forma o fator de perda é dado na Equação 2.29 determinado pela queda de 3dB nas frequências naturais  $F_1$  e  $F_2$  na resposta de aceleração acumulada de acordo com a equação anterior.

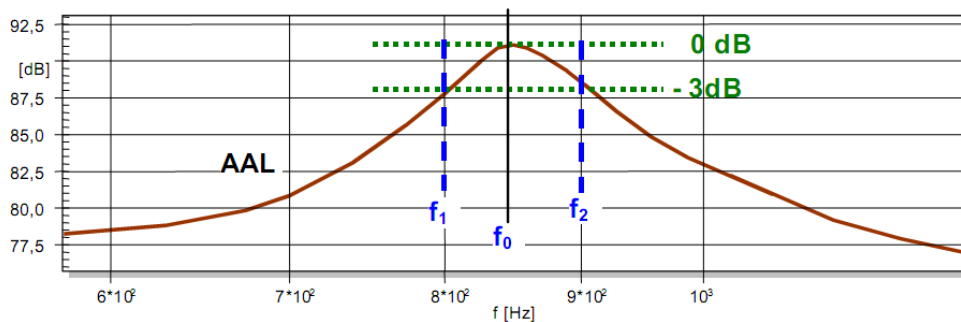


Figura 2.33 – Determinação do fator de perda do corpo de prova do material.  
Fonte: (Klippel [22], 2009)

$$\eta_i = \frac{F_2 - F_1}{F_0}. \quad (2.29)$$

Dessa forma, ao medir a FRF de uma viga engastada tem-se uma relação entre o módulo de elasticidade e as frequências modais e também entre o amortecimento e a largura de banda dos modos vibracionais. Este será o método utilizado na caracterização mecânica dos materiais que compõem o alto-falante. Detalhes experimentais são dados adiante.

### 2.2.3.2 Coeficiente de Poisson

Conforme Steffens e Fanguero [47], o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é uma das propriedades mecânicas fundamentais dos materiais e pode ser definido como a deformação transversal quando um material homogêneo e isotrópico é tensionado uniaxialmente no sentido longitudinal. O coeficiente de Poisson não estabelece a relação entre a tensão e a deformação, mas sim entre as deformações ortogonais.

Quando positivo, o valor do coeficiente de Poisson varia tipicamente entre 0,0 e +0,5 (Liu [47]). Como exemplo, a borracha possui um coeficiente de Poisson de, aproximadamente, +0,5 e o vidro e o metal, +0,3 (Bertoldi et al. [2]).

Ainda de acordo com Steffens e Fangueiro [47], a Equação 2.30 explica a relação existente entre as deformações transversal e longitudinal.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}, \quad (2.30)$$

onde:

$\nu$ : coeficiente de Poisson (adimensional);

$\varepsilon_x$ : Deformação na direção de  $x$ , que é transversal;

$\varepsilon_y$ : Deformação na direção de  $y$ , que é transversal;

$\varepsilon_z$ : Deformação na direção de  $z$ , que é longitudinal.

$\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_z$  são também grandezas adimensionais, já que são deformações.

Materiais convencionais possuem coeficiente de Poisson positivo, ou seja, contraem-se transversalmente quando esticados longitudinalmente e se expandem transversalmente quando comprimidos longitudinalmente. Os materiais auxéticos (anti-borrachas) são aqueles materiais que possuem coeficiente de Poisson negativo. Exemplos a citar são: nitretos, metais, zeólitos e silicatos (Steffens e Fangueiro [47]).

### 2.2.3.3 Densidade

A densidade, também chamada de massa volúmica ou massa volumétrica de um corpo é o quociente entre a massa e o volume desse corpo. Sendo assim, pode-se dizer que a densidade mede o grau de concentração de massa em determinado volume. O símbolo para a densidade é  $\rho$  e a unidade no sistema internacional para a densidade é quilogramas por metro cúbico  $\text{kg/m}^3$ . A Equação 2.31 é a equação geral da densidade.

$$\text{Densidade}[\text{kg/m}^3] = \frac{\text{massa}[\text{kg}]}{\text{volume}[\text{m}^3]}. \quad (2.31)$$

Entretanto, a densidade é mais comumente expressa em unidades de gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ) ou gramas por mililitro ( $\text{g/ml}$ ). A densidade absoluta é uma propriedade específica, isto é, cada substância pura tem uma densidade própria, que a identifica e a diferencia das outras substâncias.

A Tabela 2.5 apresenta valores típicos de densidade para alguns materiais que geralmente são encontrados em alto-falantes.

Tabela 2.5 – Densidade de materiais encontrados em alto-falantes.

Material	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ] (valores médios)	Notas
Celulose	36	Massa para preparo de celulose
Borracha	801	—
Resina ABS	721	—
Mica	344	—
Beryllium	1850	—

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

A densidade de um material varia com a temperatura e pressão. Esta variação é tipicamente pequena para sólidos e líquidos, mas muito maior para gases. Aumentando a pressão sobre um objeto diminui o volume do objeto e, conseqüentemente, aumenta a sua densidade. O aumento da temperatura de uma substância (com poucas exceções) diminui a sua densidade através do aumento do seu volume.

#### 2.2.4 Análise através de elementos finitos (FEA)

O Método dos Elementos Finitos tem se tornado o método mais utilizado para analisar o comportamento físico de estruturas com geometria complexa e condições de contorno ou feitos de materiais variados (Henwood e Geaves [20]).

A medição das vibrações mecânicas da unidade de acionamento é a base para uma análise da vibração e radiação, tornando mais transparente a relação entre a geometria e as propriedades do material do radiador e a saída de pressão sonora (Klippel [23]).

Os parâmetros de entrada mais básicos para uma análise de elementos finitos (FEA) é a geometria, o Módulo de Young  $E$  e o fator de perda  $\eta$  do radiador (por exemplo: cone, borda e calota) e também do motor e das partes de suspensão (por exemplo: bobina móvel, aranha) (Klippel [23]). Finalmente, os parâmetros mecânicos distribuídos abrem novos caminhos para o diagnóstico de alto-falante (Klippel [23]).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por finalidade descrever os procedimentos metodológicos desta pesquisa. A metodologia foi desenvolvida a partir do estudo da fundamentação teórica, descrito no capítulo anterior, que proporcionou o embasamento para o objetivo em verificar os benefícios da utilização da modelagem computacional como ferramenta de desenvolvimento na indústria de alto-falantes.

Segundo Prodanov e Freitas [37] o método científico é o conjunto de processos ou operações mentais que deve-se empregar na investigação científica. É a linha de raciocínio adotada no processo de pesquisa.

Na definição da metodologia, deve-se ter claro que método científico é o caminho para se chegar a determinado fim. Para Marconi e Lakatos [11] o método científico é o conjunto das atividades ordenadas e coerentes que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo e conhecimentos válidos e verdadeiros. Este, portanto, traça o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do pesquisador.

Para que o conhecimento possa ser considerado científico é necessário descrever o método que orientou todo o processo de realização das atividades, desde a concepção do tema até a descrição dos resultados finais e conclusões. Existe uma diferença entre método e pesquisa, que segundo Prodanov e Freitas [37] são as seguintes:

Método: forma de pensar para entender-se a natureza de determinado problema.

Pesquisa: modo científico para obter conhecimento da realidade empírica [...] tudo que existe e pode ser conhecido pela experiência. É o processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico.

De acordo com Marconi e Lakatos [11] a utilização de métodos científicos não é exclusiva da ciência, sendo possível usá-los para a resolução de problemas do cotidiano. Destacaram que, por outro lado, não há ciência sem o emprego de métodos científicos.

Portanto, a metodologia é de grande importância no desenvolvimento de trabalhos científicos, desta forma, a estruturação apresentada consiste em diagnosticar de forma clara todos os procedimentos e técnicas utilizados no desenvolvimento do trabalho.



### 3.1 Critérios da pesquisa

#### 3.1.1 Natureza da pesquisa

A pesquisa teve por objetivo verificar os benefícios da utilização da modelagem computacional como ferramenta de auxílio no desenvolvimento de produto em uma indústria de alto-falantes. Desta forma, pode-se afirmar que a natureza da pesquisa é do tipo aplicada. Segundo Prodanov e Freitas [37] tal estudo procura produzir conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

Para alcance dos fins pretendidos, o estudo foi realizado em uma empresa multinacional no ramo de alto-falantes, que possui em seu organograma a área de desenvolvimento de produto denominado Engenharia de Produto.

Cabe à Engenharia de Produto desenvolver o alto-falante, gerenciar cronogramas, recursos, insumos e demais demandas recorrentes ao desenvolvimento. Sendo assim, foi realizado um levantamento nos registros dos últimos produtos desenvolvidos e lançados, onde foi verificada a carência de ferramentas e técnicas para acelerar o PDP.

Segundo Neves e Domingues [31] é importante que o estudo seja relevante para a instituição à qual o pesquisador pertence e apresente a possibilidade de agregar algum conhecimento ou visão particular a respeito de um determinado assunto.

Outro ponto importante destacado por Neves e Domingues [31] refere-se ao fato da permissão e compartilhamento do conhecimento adquirido. Sob a ótica do compartilhamento do conhecimento, a pesquisa aplicada é, normalmente, recomendada, haja vista que seus conteúdos são, na maioria das vezes, continuação de outros já disponibilizados.

#### 3.1.2 Objetivo do estudo

Sendo o objetivo geral da pesquisa a verificação dos benefícios da utilização da modelagem computacional como ferramenta de desenvolvimento na indústria de alto-falantes, pode-se classificar o objetivo do estudo como exploratório, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o explícito ou construindo hipóteses sobre ele.

### 3.1.3 Coleta de dados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados em laboratório, devido à necessidade de utilização de equipamentos altamente tecnológicos e com precisão elevada. Isto permite uma maior precisão e um menor erro inserido nos valores medidos. Devido a fins de sigilo, o nome na empresa foi preservado.

### 3.1.4 Critério de análise de dados

Para a análise utilizou-se, também, o critério de comparação com literatura similar. Neste critério, os conceitos, as hipóteses ou teorias do estudo foram comparadas com a literatura similar, gerando uma teoria com nível conceitual mais aprofundado, mas, com validade interna e aplicação.

## 3.2 Planejamento da pesquisa

Com a utilização de dados mensuráveis e com uma abordagem quantitativa, a pesquisa apresenta fundamentação teórica e prática. As filosofias de desenvolvimento de um alto-falante foram comparadas e os resultados serviram para análise, compreensão e considerações sobre a metodologia proposta.

Portanto, neste item são apresentadas as ações realizadas para o alcance dos interesses da pesquisa. De forma sucinta e objetiva as tarefas estão listadas no decorrer desta seção.

### 3.2.1 Ações e tarefas propostas para aplicação

As ações realizadas para aplicação da pesquisa estão listadas na sequência, bem como as peculiaridades inerentes de cada atividade:

- Verificação e medição do tempo de DNP através da filosofia atual, sem o uso de modelagem computacional;
- Medição das propriedades mecânicas de diversas amostras usadas na construção dos alto-falantes;
- Construção do modelo em elementos finitos de alto-falantes típicos: análise vibracional e acústica;
- Comparação do modelo baseado no método do circuito eletroacústico com o modelo

baseado no método dos elementos finitos;

- Validação experimental: comparação da FRF, sensibilidade e direcionalidade com os modelos computacionais. Análise das limitações dos modelos e do experimento;

- Análise de sensibilidade do modelo em elementos finitos: averiguação de quais etapas do processo de fabricação são mais sensíveis;

- Análise dos ganhos obtidos com o uso da modelagem computacional.

### 3.2.2 Construção de modelos computacionais

Os dados e resultados coletados na medição das propriedades mecânicas dos materiais foram usados para a construção dos modelos. Estes dados foram mensurados em laboratório, como já abordado anteriormente. Após a coleta dos dados tais resultados foram verificados e confrontados com a literatura técnica para conferência, a fim de evitar inconsistências e altos erros de medição. De posse de valores confiáveis, iniciou-se o processo de modelagem computacional.

A utilização de modelagem computacional foi empregada para construir os modelos dos transdutores e desta forma, identificar o comportamento do alto-falante. A modelagem teve como base a análise multi-física através do método do circuito eletroacústico equivalente e do método de elementos finitos.

Com a validação experimental os modelos puderam ser empregados com confiança e precisão em novos produtos, trazendo assim, entre outros benefícios já citados, a redução do tempo de desenvolvimento de produto.

## 4 APLICAÇÃO

A Aplicação buscou atender os objetivos da pesquisa, utilizando as técnicas apresentadas na Metodologia. Inicialmente há a apresentação da caracterização dos materiais, a criação do banco de dados com estas propriedades e a criação dos Boletins Técnicos (BT). Estes boletins servem, também, para auxiliar no controle de qualidade da produção, o que agrega mais oportunidade e aplicação para o estudo. Neste capítulo também é avaliado o projeto de um alto-falante através da modelagem computacional, onde, ao final, os resultados obtidos através da simulação são confrontados com os resultados dos protótipos montados.

### 4.1 Caracterização de Materiais

A etapa de aplicação visa atender ao objetivo geral e aos objetivos específicos, seguindo a metodologia sugerida. Ao utilizar simulações computacionais, independente da área de aplicação, é necessário, além de se conhecer a ferramenta de modelagem, possuir um banco de dados de materiais que seja confiável e eficiente.

É sabido que o processo para levantar as propriedades, sejam elas mecânicas, elétricas, químicas e/ou físicas, tradicionalmente, trazem um custo elevado. Muitas vezes, ao adicionar o custo da caracterização dos materiais junto ao custo de implementação do *software* de simulação, tornam inviável o projeto de implantação desta nova ferramenta na indústria.

Logo, é verificada a união entre esses dois recursos de projeto, ou seja, deve-se ter as propriedades do material e a ferramenta de modelagem (*software* de simulação). É notável, também, que não há utilização ou fica inviável o investimento em programas CAE se não se deseja caracterizar os materiais, pois como simples exemplo, o *software* CAE não conseguirá distinguir a diferença entre simular uma treliça feita de aço de outra treliça feita de borracha.

Muitas vezes, os próprios *softwares* de modelagem e simulação computacional trazem consigo pequenas bibliotecas de materiais. Apesar destas pequenas bibliotecas que acompanham a ferramenta apontarem uma direção e de certa forma inserir um pequeno grau de confiança na simulação, as propriedades ali descritas são apenas para materiais tradicionais e /ou puros: como aço, alumínio, cobre, entre outros. Essas pequenas bibliotecas que acompanham programas de CAE, ou propriedades adquiridas em pesquisas com fontes não confiáveis (sites de busca, folhetos comerciais e outros) não servem para simulações onde o material que será utilizado não é puro ou é algum tipo de composto. Portanto, como exemplo, na indústria

de alto-falantes tradicionalmente, utiliza-se cone de celulose e na gama de opção de cones de celuloses há várias “receitas/formulações” que alteram as propriedades finais do componente. Sendo assim, não é correto considerar sempre parâmetros “padrões” de celulose para qualquer material de cone que possua em sua receita determinada quantia de celulose.

Neste contexto, dentro do processo de fabricação de cones de celulose, com certeza a maior parte da formulação/receita carrega celulose. Todavia, dependendo da aplicação e do produto final, pode-se adicionar nessas receitas materiais como: fibras longas ou curtas de sizal, resinas fenólicas, pasta mecânica, aditivos para pintura, aditivos para impermeabilização, dentre outros recursos. Dessa forma, cada receita ou “massada” (termo utilizado para o processo de fabricação de cones), gera um material específico com propriedades definidas e que os diferem uns dos outros, tanto em parâmetros mecânicos, quanto em questões auditivas, como, por exemplo, o timbre diferente entre dois cones de celulose de receitas diferentes.

Portanto, sabendo dessas peculiaridades dos materiais utilizados para confecção de alto-falantes, a primeira tarefa é, sem sombra de dúvidas, montar uma base sólida e com dados confiáveis para então seguir com as simulações computacionais.

#### 4.1.1 Criação de banco de dados

Por motivos de sigilo e proteção do conteúdo intelectual e privado da empresa onde foi aplicado o estudo, não será referenciado código ou nomenclatura do material que está sendo utilizado. Dessa forma, os materiais foram apresentados onde tradicionalmente são utilizados (em qual componente) e identificação genérica, por exemplo: *Material 01 – Utilizado para confecção de forma de bobina*. Durante o desenvolvimento e projeto do alto-falante, há duas áreas onde se aplica a simulação computacional: Modelagem magnética e Modelagem mecânica / acústica. Assim, o banco de dados geral com as propriedades dos materiais deve prever informações magnéticas e mecânicas. Obviamente, há casos de materiais onde as propriedades magnéticas não são importantes, como exemplo, tem-se: materiais plásticos, espumas, celulose e outros.

##### 4.1.1.1 Propriedades magnéticas

A primeira propriedade diz respeito à simulação do fluxo magnético dentro do circuito magnético (afas e imã). Nessa situação está difundido nas indústrias o uso do *software* de simulação *Finite Elements Method Magnetics* - (FEMM) que atualmente está na sua versão 4.2,

sendo que há uma versão gratuita que atende às necessidades desta pesquisa. Portanto, com essa condição é necessário apenas caracterizar as propriedades magnéticas dos componentes metálicos utilizados, ou seja, não há custo para aquisição desta ferramenta de modelagem computacional. Assim sendo, as propriedades magnéticas são facilmente encontradas com os fornecedores e fabricantes do ímã permanente, não havendo necessidade de caracterizar tal material na empresa.

De modo que os demais componentes do conjunto magnético (afas e entreferro) são peças metálicas. Conhecendo as respectivas ligas (aço 1008, 1020 por exemplo) de tais componentes é relativamente fácil encontrar os parâmetros magnéticos destes itens com o fabricante. Entretanto, pode-se criar ligas específicas com proporções de carbono, silício e outros materiais para uso exclusivo, logo, para tais situações a utilização de "materiais genéricos" da própria biblioteca do FEMM não é aconselhável.

A Figura 4.1 apresenta os valores de coercividade para materiais utilizados no ímã permanente.

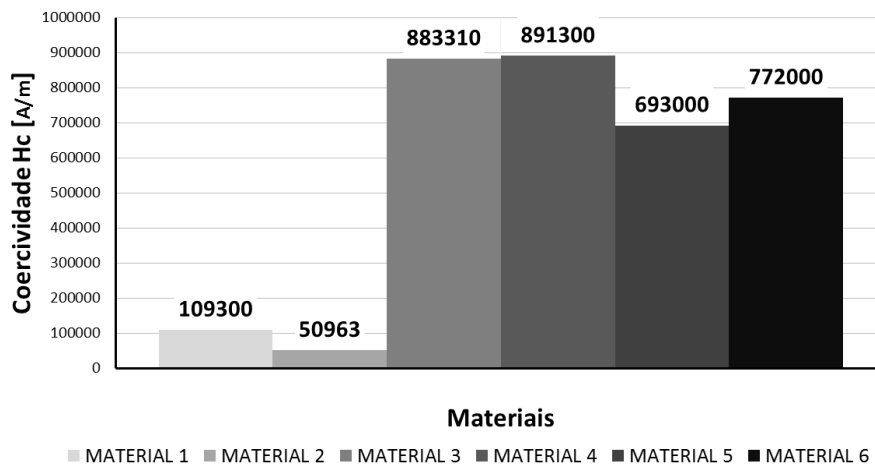


Figura 4.1 – Valores de coercividade de ímãs existentes na biblioteca de materiais do *software* FEMM.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Atualmente na indústria de alto-falantes os ímãs feitos de ferrite são os mais empregados, devido ao seu baixo custo. Entretanto, os ímãs chamados de terras raras são os que apresentam maiores valores de coercividade, mas, em contrapartida, seu custo é o principal fator que vem barrando sua utilização em larga escala.

A Figura 4.2 demonstra alguns valores de permeabilidade magnética relativa  $\mu_r$  de materiais utilizados nos componentes metálicos do CM (placa frontal, placa traseira e peça polar).

De acordo com a pureza do material maior é o valor de permeabilidade magnética. Os dados apresentados também foram retirados da biblioteca do *software* de simulação FEMM.

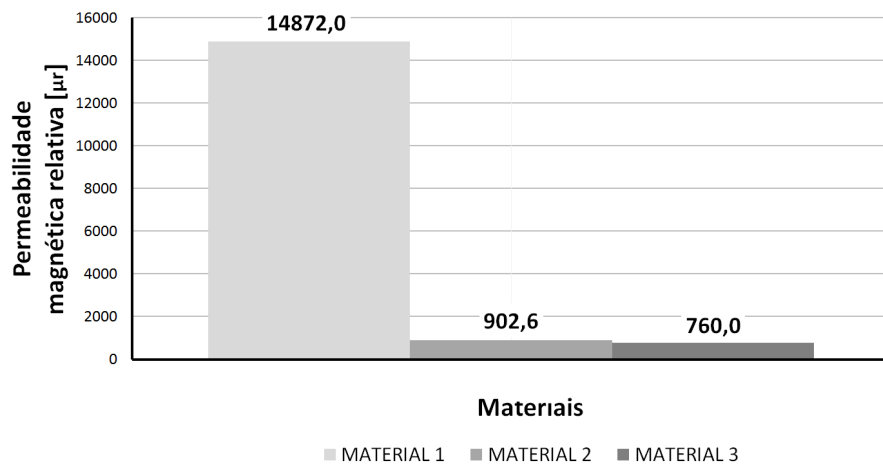


Figura 4.2 – Valores de permeabilidade magnética [ $\mu_r$ ] de metais existentes na biblioteca de materiais do *software* FEMM.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Como visto anteriormente, a indicação do material que compõe a estrutura é importante para os resultados que se pretende obter e essa indicação está presente logo nas primeiras etapas da modelagem. A Figura 4.3 apresenta o fluxo para simulação utilizado no FEEM.

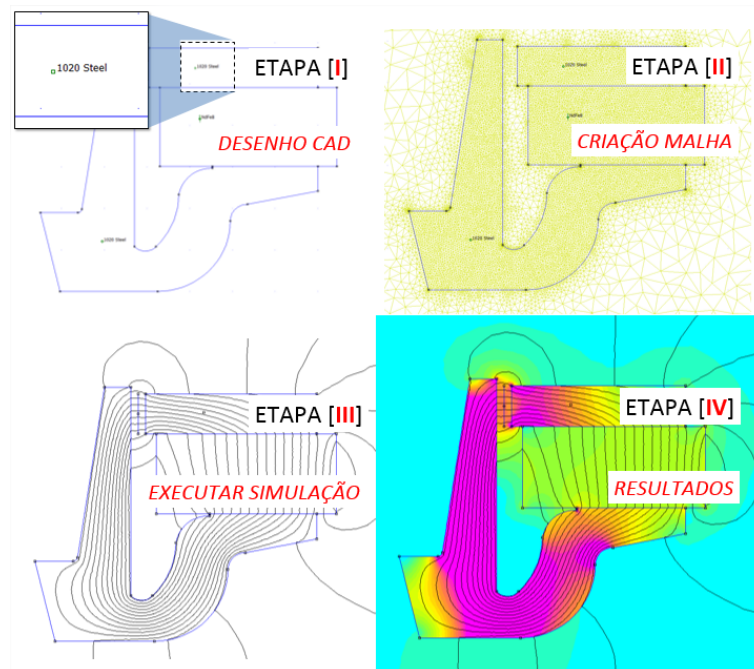


Figura 4.3 – Fluxo de simulação magnética no CM de um alto-falante.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Como apresentado no fluxo de simulação, a indicação do material é na primeira etapa,

logo após a importação do desenho em CAD do transdutor que será modelado. A Figura 4.4 apresenta os resultados que são obtidos após rodar a simulação no FEMM.

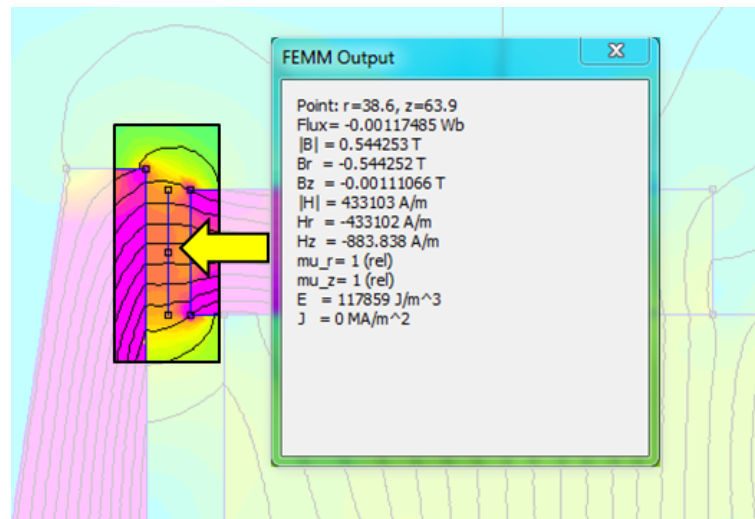


Figura 4.4 – Valores modelados do fluxo magnético no *gap* do alto-falante.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Usualmente a biblioteca de materiais com propriedades magnéticas é muito menor em tamanho do que a biblioteca de propriedades mecânicas. Essa diferença de tamanho se deve ao fato de que as indústrias procuram manter certa continuidade no mesmo material que não é produzido na própria planta. Para elucidar isso há o exemplo de que peças metálicas podem até ser usinadas ou estampadas por processos internos na própria planta, mas, o processo de fabricação do aço e sua respectiva liga é a mesma e é comprada como matéria-prima. Assim, apesar de que as diversas geometrias das peças (afas, entreferro e outros componentes) alterarem as características do material do respectivo componente do AF, permanecem as mesmas.

O mesmo conceito vale para os ímãs. A indústria define quais as propriedades desejadas e busca fornecedores que atendam essas especificações. Assim, peças metálicas do conjunto magnético são de difícil customização, há grandes restrições para se alterar a composição, o que é totalmente diferente do processo de fabricação de um cone, por exemplo. Neste último caso, o processo é feito dentro da empresa, e a receita pode ser alterada a qualquer momento.

#### 4.1.1.2 Propriedades mecânicas

Há uma grande diferença, na questão de implementação, entre as propriedades mecânicas e as propriedades magnéticas na fábrica de alto-falantes. A facilidade em implementar novos materiais com pequenas alterações de processo, para o conjunto móvel tornam esta área



do banco de dados, que aborda as propriedades mecânicas, bastante extensa e com diversas opções de materiais. Entretanto, as propriedades magnéticas tendem a assumir valores fornecidos pelos fabricantes dos materiais que formam o conjunto magnético. Não restando assim, muitas opções para alterações destas propriedades junto à equipe de desenvolvimento de produto.

Como apresentado anteriormente, nos parâmetros mecânicos, o conjunto magnético está ligado diretamente ao motor e à força do alto-falante, por isso, a importância de uma definição de  $\beta l$  com precisão e exatidão. Sendo assim, do ponto de vista prático, os demais parâmetros de TS ou alterações na curva de resposta do alto-falante são influenciados mais fortemente pelas propriedades mecânicas dos componentes como: suspensão, aranha, calota e cone.

Dentre os parâmetros mecânicos, quatro deles possuem destaque e são de suma importância para o levantamento e a base funcional dos *softwares* de modelagem e simulação computacional. São eles:

- Densidade;
- Módulo de Young;
- Fator de perda e
- Coeficiente de Poisson.

A determinação da densidade é de extrema importância, pois este dado serve de parâmetro para determinar os demais parâmetros mecânicos. Logo, erros inseridos na determinação da densidade, trazem para os demais processos de medição e caracterização, aumento na imprecisão dos dados mensurados. Tais erros podem ser gerados pela operação da medição, amostras não uniformes ou interferências do meio (temperatura, umidade, e outras) e assim, acarretam erros significativos nos parâmetros.

### **Densidade**

Para determinação da densidade, não há grande dificuldade. Como visto no Capítulo 2, a densidade é o quociente da massa pelo volume; obviamente, formas geométricas complexas tornam complexa a determinação do volume. Para simplificar o cálculo do volume foram criados corpos de prova (em formato de viga) com dimensões aproximadas de 80 mm x 10 mm x 1 mm (comprimento x largura x espessura). Como exemplos, foram selecionados cinco diferentes materiais utilizados, principalmente, para fabricação da forma da bobina. Tais materiais foram nomeados de Material 1, 2, 3, 4 e 5.

Primeiramente, foram confeccionados dez corpos de prova para cada material; em seguida, foram levantadas as dimensões de cada amostra. A Figura 4.5 apresenta a medição da

espessura e da largura, respectivamente, de um dos corpos de prova, por exemplo.



Figura 4.5 – Medida de espessura, comprimento e largura do corpo de prova de material utilizado em formas de bobina.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Foi desenvolvido um gabarito para corte dos corpos de prova que possui uma ferramenta de corte que deve criar amostras apenas com 10 mm de largura. Como pode ser visto na Figura 4.5 o corpo de prova em medição apresentava um valor de 10,07 mm, ou seja, se não fosse realizada a medição com o paquímetro e fosse considerado o “valor nominal” do gabarito de corte, haveria um erro de 0,7% sobre o valor da largura.

Nesta filosofia, todos os cinquenta corpos de prova dos cinco materiais foram ordenadamente pesados, cada um, conforme as suas dimensões. A Figura 4.6 apresenta a pesagem de um dos corpos de prova.



Figura 4.6 – Medida da massa do corpo de prova para determinação de  $\rho$  do material utilizado em forma de bobina.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

De posse do volume e da massa de todos os corpos de prova, pode-se calcular a densidade para cada material. Com base nos valores de densidade para os dez corpos de prova de

cada material, fez-se uma média amostral. Com este valor médio de densidade, para cada um dos cinco materiais, foram determinados limites aceitáveis sobre o valor médio. Esta margem de valores aceitáveis de  $\pm 3\%$  sobre este valor médio amostral é o mesmo considerado para os demais processos de medição aplicados na indústria onde a pesquisa foi realizada. Por fim, todas as amostras desse respectivo material que tinham densidade fora do limite de  $\pm 3\%$  foram descartadas do processo. Sendo assim, o valor de densidade de cada material se deu apenas com os valores de densidade que ficaram dentro do intervalo estipulado. A seguir estão apresentados os valores encontrados de densidade para cada corpo de prova.

A Figura 4.7 apresenta a análise da densidade para cada corpo de prova do Material 1, que é utilizado para confecção de formas de bobina.<sup>7</sup>

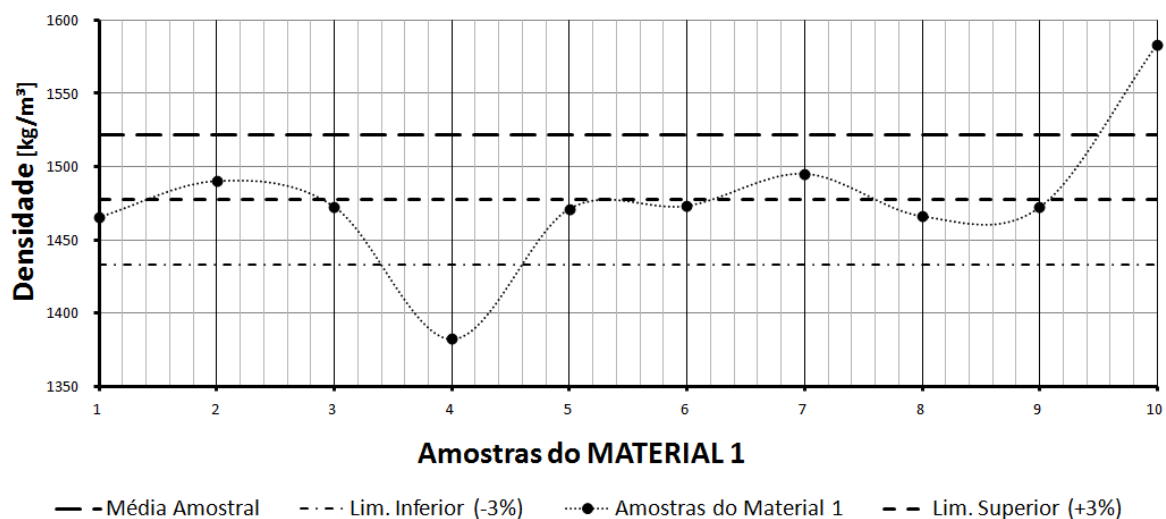


Figura 4.7 – Variação de densidade nas amostras do Material 1.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Com base nos valores de densidade encontrados nos corpos de prova do Material 1, percebe-se que apenas os valores das amostras 4 e 10 estão fora do intervalo estipulado. Assim, estes valores não foram considerados para determinar o valor de Densidade do Material 1.

Da mesma forma do material anterior, a Figura 4.8 apresenta a análise da densidade para cada corpo de prova do Material 2.

No Material 2, apenas a amostra 9 apresentou um valor fora do limite tolerado. Portanto, a amostra 9 não contribuiu para a determinação da densidade do Material 2, que também é utilizado para confecção de formas de bobina.

<sup>7</sup> Para elaboração dos gráficos deste capítulo foi utilizada a interpolação polinomial da planilha de cálculos *Excel*.

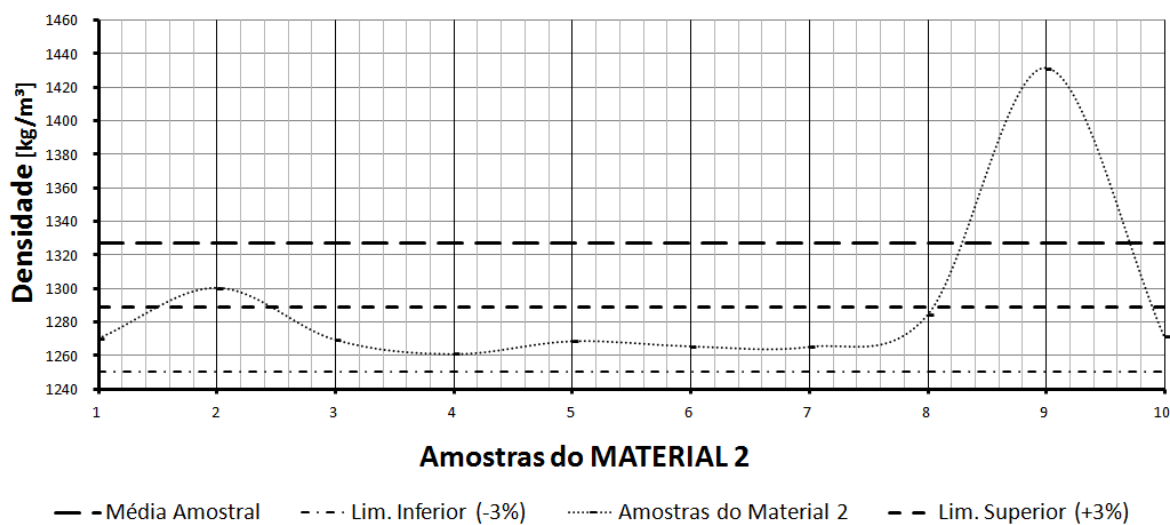


Figura 4.8 – Variação de densidade nas amostras do Material 2.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Seguindo com a determinação de densidades, a Figura 4.9 apresenta a análise da densidade para cada corpo de prova do Material 3 .

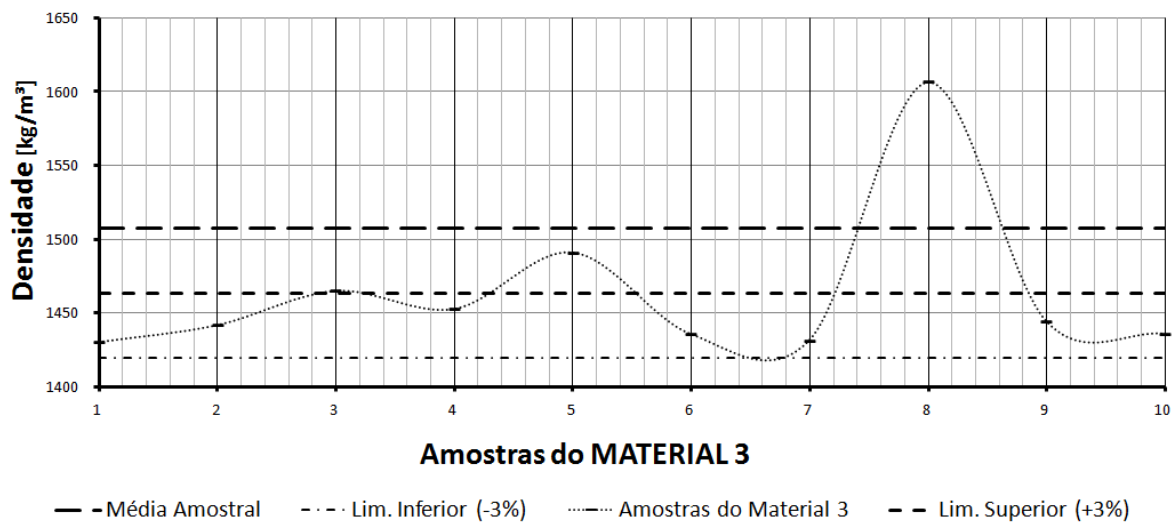


Figura 4.9 – Variação de densidade nas amostras do Material 3.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

No Material 3, apenas a amostra 8 não apresentou a densidade medida dentro do limite especificado. Continuando a Figura 4.10 apresenta a análise da densidade para cada corpo de prova do Material 4.

Conforme análise do Material 4, as amostras não conformes foram as amostras 4 e 10.

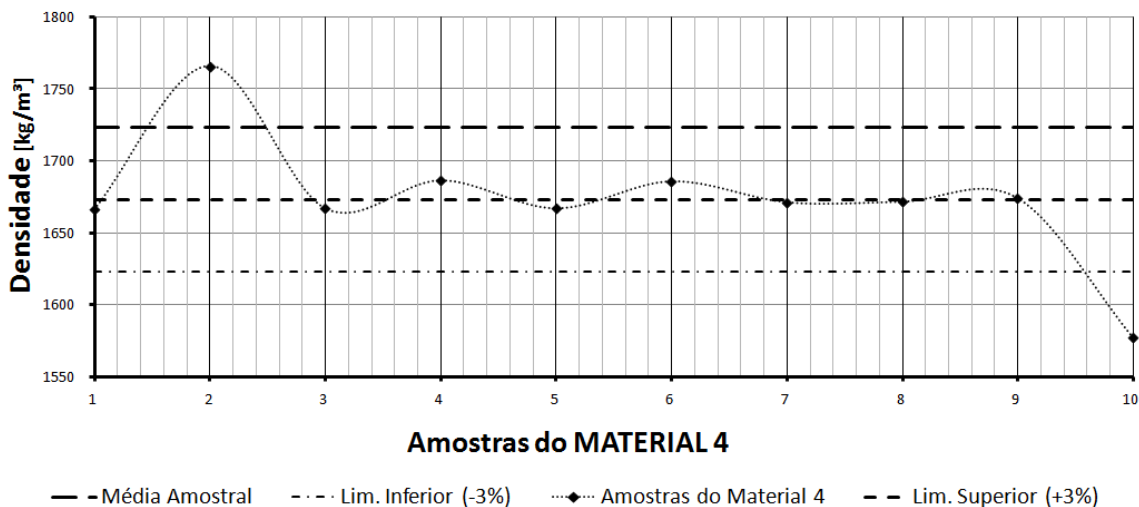


Figura 4.10 – Variação de densidade nas amostras do Material 4.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Por fim, a Figura 4.11 apresenta a análise da densidade para cada corpo de prova do Material 5.

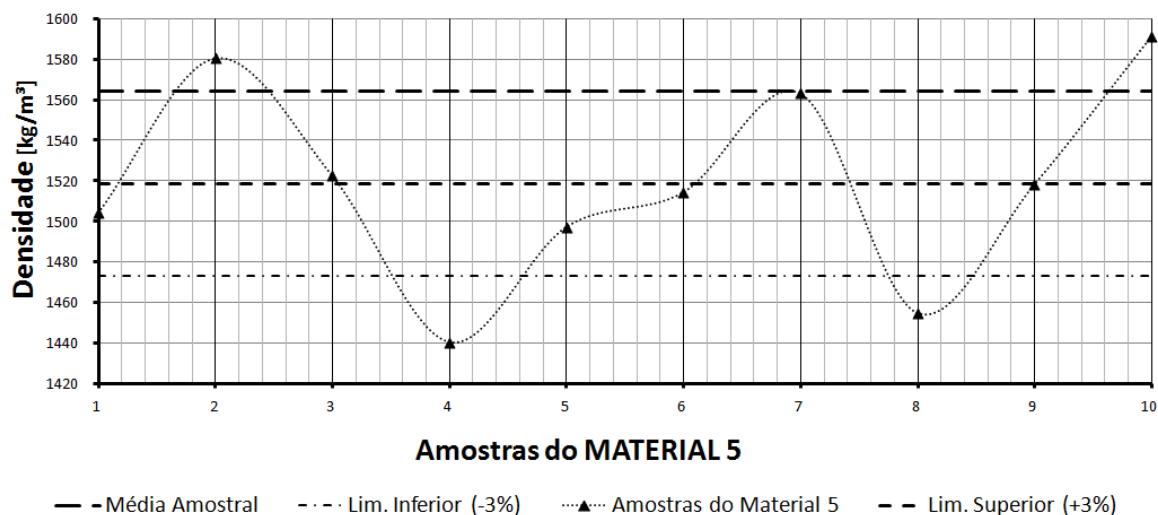


Figura 4.11 – Variação de densidade nas amostras do Material 5.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

O Material 5 foi o que apresentou maiores divergências entre o valor médio e os demais. Da mesma forma, as amostras 2, 4, 8 e 10 não contribuíram para a determinação da densidade do Material 5.

Para fins de comparação geral da densidade entre os materiais utilizados na confecção de forma de bobina, a Figura 4.12 apresenta o valor de densidade para todas as amostras dos ma-

teriais avaliados (1 ao 5). Percebe-se que apesar de alguns valores discrepantes entre amostras do mesmo material, cada material, possui sua densidade característica.

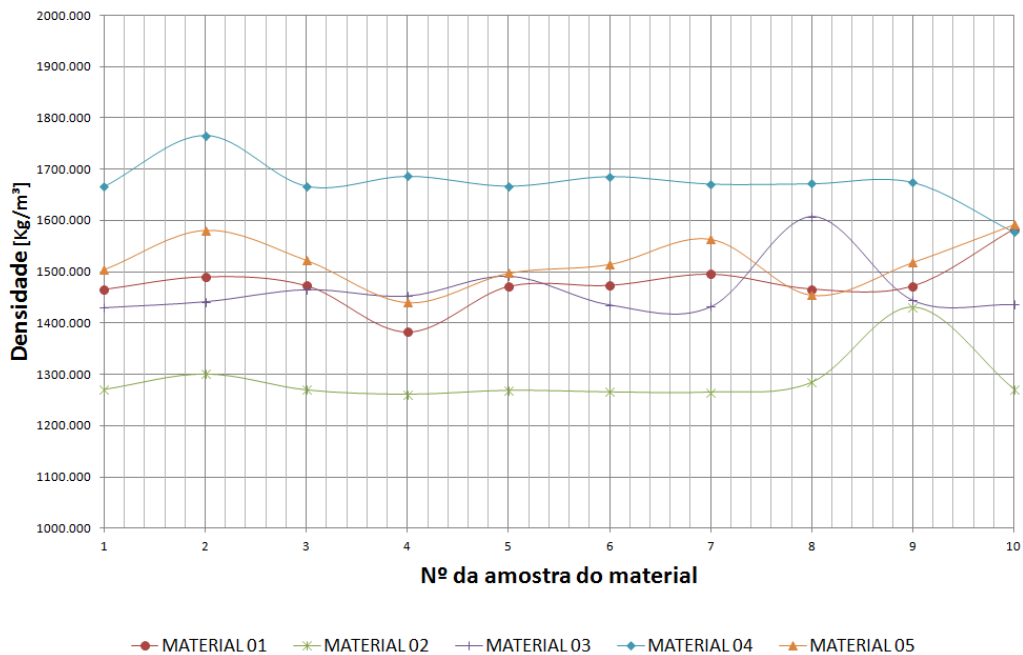


Figura 4.12 – Valor de  $\rho$  para as amostras dos materiais avaliados que são utilizados em formas de bobina.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Portanto a densidade dos Materiais 1, 2, 3, 4 e 5 seguiram a filosofia apresentada, ou seja, os valores amostrais que ficaram fora dos limites estipulados de  $\pm 3\%$  não foram contabilizados no cálculo da média das respectivas amostras do material em ensaio. Este valor médio encontrado, para cada situação, foi atribuído como valor da densidade do respectivo material.

A Figura 4.13, por fim, apresenta os valores finais de densidade que foram atribuídos para cada um dos materiais ensaiados que, tipicamente, são utilizados para confecção de formas de bobinas.

Conforme apresentado na Seção 2.2.1.2, uma maneira de aumentar a sensibilidade de um alto-falante é através da redução de massa do conjunto móvel. Partindo desta premissa e avaliando apenas a densidade, percebe-se que para uma mesma bobina, porém com materiais diferentes, pesos diferentes existirão. Obviamente, a escolha por materiais para formas de bobina com densidades diferentes ou maiores está ligada a questões de projeto.

Uma vez que, dependendo da potência nominal do alto-falante, a bobina precisará ser mais robusta com componentes aptos e capazes de fornecer estrutura e suportar altas temperaturas, os demais materiais utilizados nos diversos componentes do alto-falante também devem

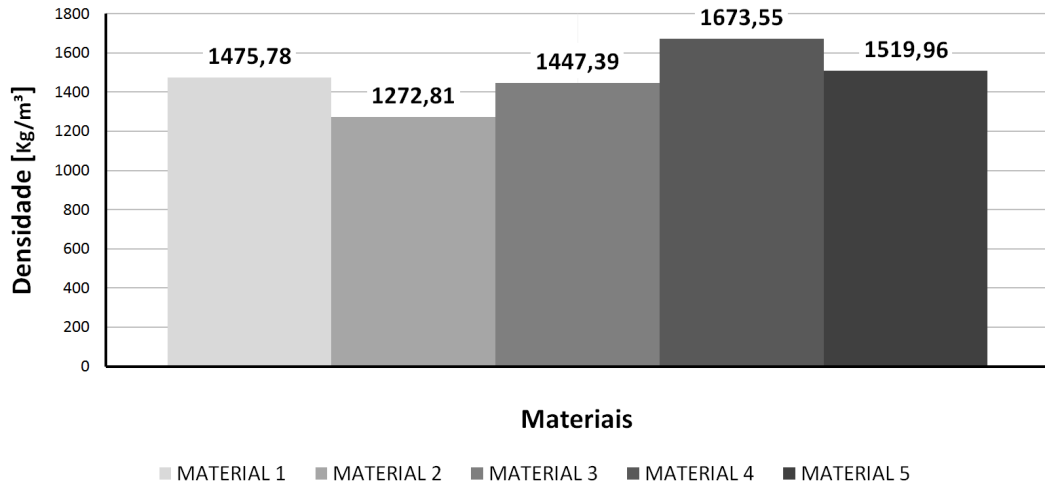


Figura 4.13 – Valor de  $\rho$  atribuído para cada material de forma de bobina.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

seguir a filosofia adotada.

Com objetivo de demonstrar a contribuição da densidade de cada componente em um alto-falante típico, a Figura 4.14 apresenta um transdutor e ao lado os respectivos valores de  $\rho$ .

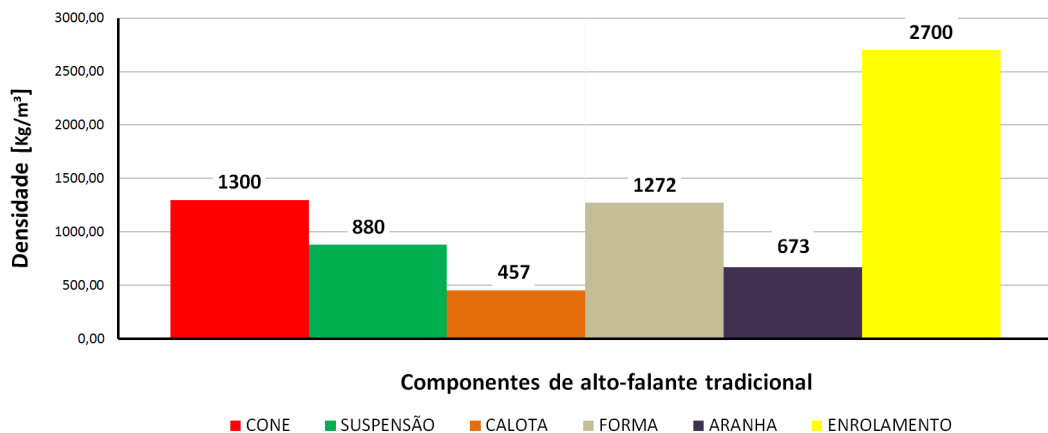


Figura 4.14 – Valor de  $\rho$  atribuído para cada componente do AF.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Analisando a Figura 4.14 verifica-se que a maior densidade é, tipicamente, encontrada no material do enrolamento da bobina que é formado por cobre ou alumínio. Entretanto, apesar desse componente ter o maior valor de  $\rho$ , ele não é um item grande geometricamente, ou seja, não agrega muita massa ao sistema móvel. O mesmo acontece para o material da forma da bobina, onde o enrolamento está fixado. A densidade desse material é alta em relação aos demais, porém o componente é pequeno. O segundo maior valor de densidade geralmente está localizado no material que compõe o cone. Esse componente, na grande maioria dos casos, é feito de

massa de celulose com acréscimo de outros insumos e, em comparação aos demais componentes do AF, é o de maior dimensão. Na prática, sempre que se deseja reduzir peso do conjunto móvel, inicia-se trabalhando e verificando a possibilidade de redução desse componente.

### Módulo de Young e Fator de Perda

O Módulo de Young, ou também conhecido como “Elasticidade”  $E$ , é um parâmetro fundamental para análises e simulações que envolvam vibração. Acompanhado desse parâmetro está o Fator de perda  $\eta$ , também fundamental para análises modais. Esses dois parâmetros foram avaliados em conjunto.

A determinação desses parâmetros utilizou o módulo de *Material Parameter Measurement* - MPM<sup>8</sup> da Klippel. Conforme visto na Seção 2.2.3, esse método estimula a vibração da viga em ensaio com um alto-falante e com um microfone dentro da caixa acústica consegue medir a força aplicada na amostra. O deslocamento (vibração) da amostra é avaliado e registrado por um *laser* que acompanha o módulo MPM da Klippel.

A Figura 4.15 apresenta o instrumento de medição de parâmetros mecânicos de materiais da Klippel. Este dispositivo possui seus respectivos intervalos de operação e condições onde os resultados podem ser considerados válidos.



Figura 4.15 – Instrumento de medição das propriedades mecânicas - Módulo MPM da Klippel.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Basicamente, esse dispositivo é composto por um alto-falante que excita a viga com uma varredura (*sweep*) de frequência e um vibrômetro laser capaz de verificar o movimento da amostra sob ensaio. Como visto no Capítulo 1, para contar com resultados confiáveis algumas premissas precisam ser seguidas. A Tabela 4.1 apresenta os intervalos de funcionamento do dispositivo.

<sup>8</sup> Módulo específico para caracterização de materiais. Dispositivo desenvolvido pela Klippel GmbH.



Tabela 4.1 – Limites de operação do módulo MPM - Klippel.

Parâmetro	Símbolo	Mínimo	Típico	Máxima	Unidade
Módulo de Young	$E$	0	—	—	MPa
Fator de Perda	$\eta$	0,0001	0,1	1	—
Fator Q (relacionado ao fator de Perda)	$Q$	80	20	0	dB
Frequência de Ressonância	$f$	20	—	100	Hz
Densidade	$\rho$	0	100	—	kg/m <sup>3</sup>
Espessura	$D$	0	0.5	—	mm
Tensão mínima de estímulo	$U_{\min}$	0,0001	0,01	—	V
Tensão máxima de estímulo	$U_{\max}$	0,0001	2	50	V
Ajuste de deslocamento da amostra	$X_{\text{target}}$	0,01	0,2	2	mm
Comprimento da viga em ensaio	$L$	15	—	50	mm

Fonte: (KLIPPEL, 2013)

Conforme a Tabela 4.1 a frequência de ressonância dos corpos de prova devem estar entre 20 Hz e 100 Hz. Para se conseguir obter esse intervalo, foi necessário, em algumas amostras ajustar o comprimento da viga em vibração. A Figura 4.16 demonstra o dispositivo, tipo gabarito, para ajuste do tamanho da amostra em teste.

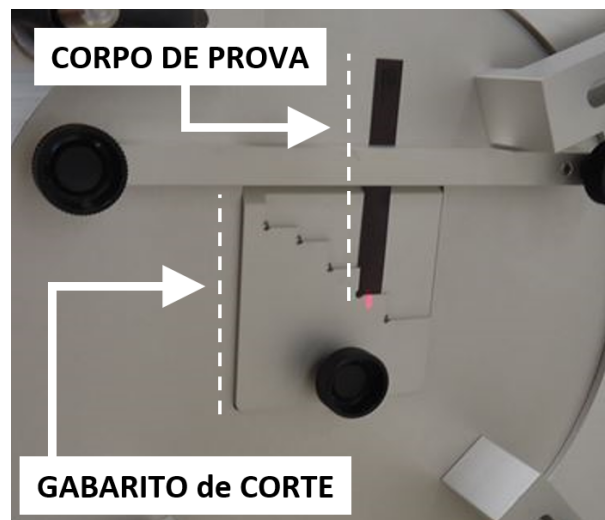


Figura 4.16 – Gabarito para ajuste de comprimento da viga do corpo de prova.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

O deslocamento da amostra é mensurado com o *laser*, de acordo com a Tabela 4.1. Foi necessário acompanhar, também, a amplitude máxima do deslocamento. A Figura 4.17 apresenta a configuração e posicionamento do *laser* e do corpo de amostra.

Com o entendimento de funcionamento do dispositivo para caracterização de  $E$  e  $\eta$ , as amostras dos cinco materiais utilizados para fabricação de formas de bobina, que tiveram suas densidades mensuradas anteriormente, foram novamente utilizadas para levantamento desses



Figura 4.17 – Posicionamento do laser para leitura da vibração do corpo de prova da amostra.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

parâmetros. A Figura 4.18 apresenta os valores de  $E$  para cada uma das dez amostras de cada material.

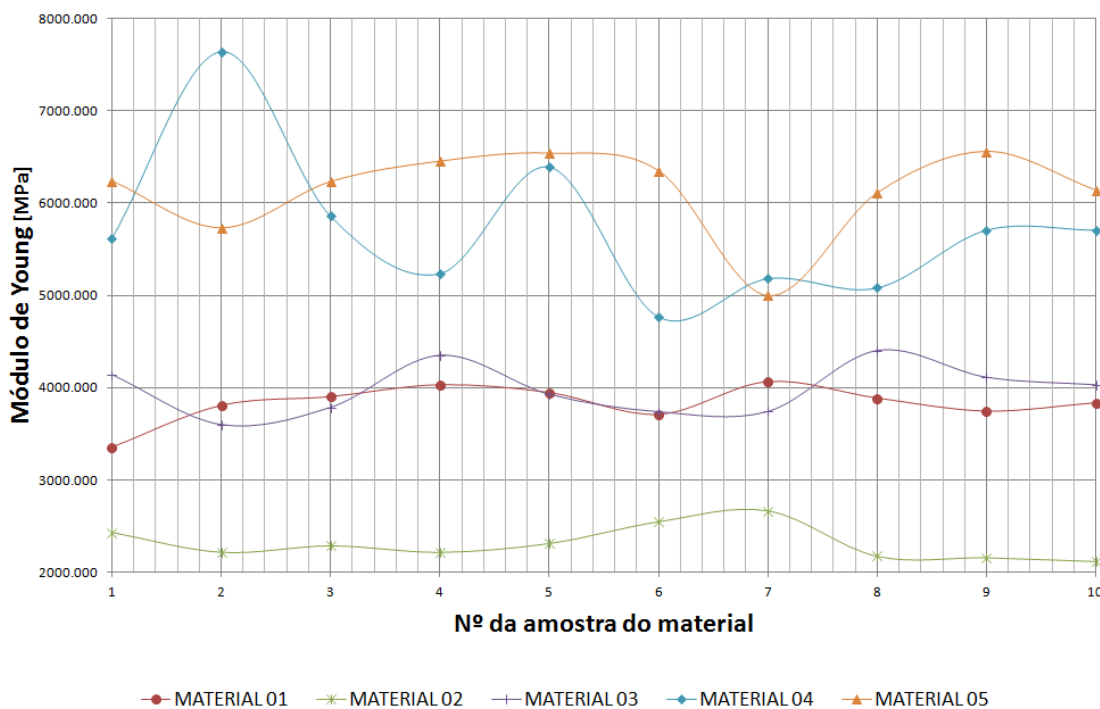


Figura 4.18 – Valor de  $E$  para as amostras dos materiais de forma de bobina.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Como a densidade é um dado de entrada para a determinação do módulo elasticidade, as variações encontradas anteriormente também são visualizadas neste comparativo. Há um reflexo das oscilações encontradas na determinação da densidade aqui na propriedade  $E$ .

A determinação do Módulo de Young e do Fator de Perda seguiram a mesma metodologia apresentada para determinação da densidade. Embora tenham sido medidos dez corpos de prova de cada um dos cinco materiais de forma de bobina, apenas as amostras que possuíam

densidade dentro do limite de tolerância estipulado, contribuíram para a média e determinação de  $E$  e  $\eta$  para cada material.

A Figura 4.18 apresenta os valores de  $E$  para todos os corpos de prova avaliados, novamente. Percebe-se as variações nas amostras do mesmo material. Entretanto, também há diferenças entre a "média" dos materiais, o que demonstra que há certa diferença de elasticidade para cada um dos cinco materiais de formas de bobina.

Da mesma forma apresentada para elasticidade, há também variações encontradas para o fator de perda  $\eta$ , o que é visto na a Figura 4.19. Tanto as informações de elasticidade e de amortecimento, são características físicas do material e tais valores podem ser encontrados com processos de fabricação ou, até mesmo, de acordo com a composição química e estrutural do material do componente.

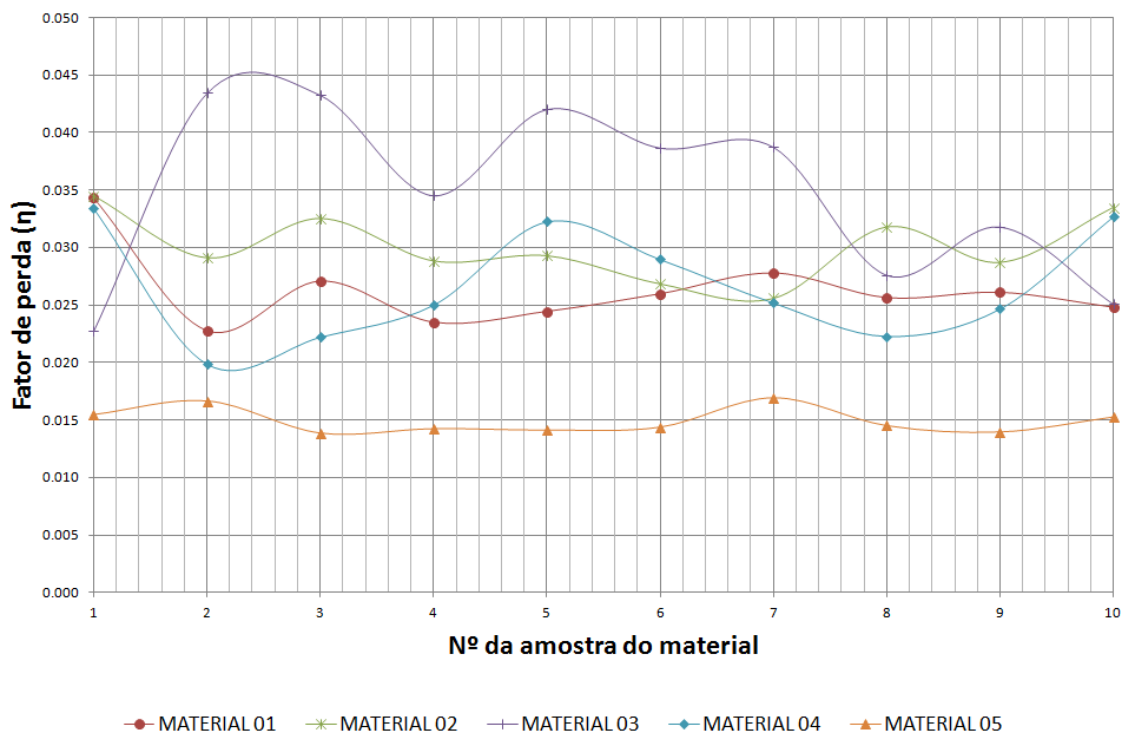


Figura 4.19 – Valor de  $\eta$  para as amostras dos materiais utilizados para confecção de forma de bobina.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Outro parâmetro obtido com a caracterização é o Fator Q, apresentado pela amostra. Este parâmetro serve como comparação entre amostras do mesmo material, pois apresenta a magnitude da vibração aplicada à viga. A Figura 4.20 apresenta este parâmetro para cada uma das amostras.

Por fim, foi atribuído como valor de elasticidade  $E$  para cada material que compõe a

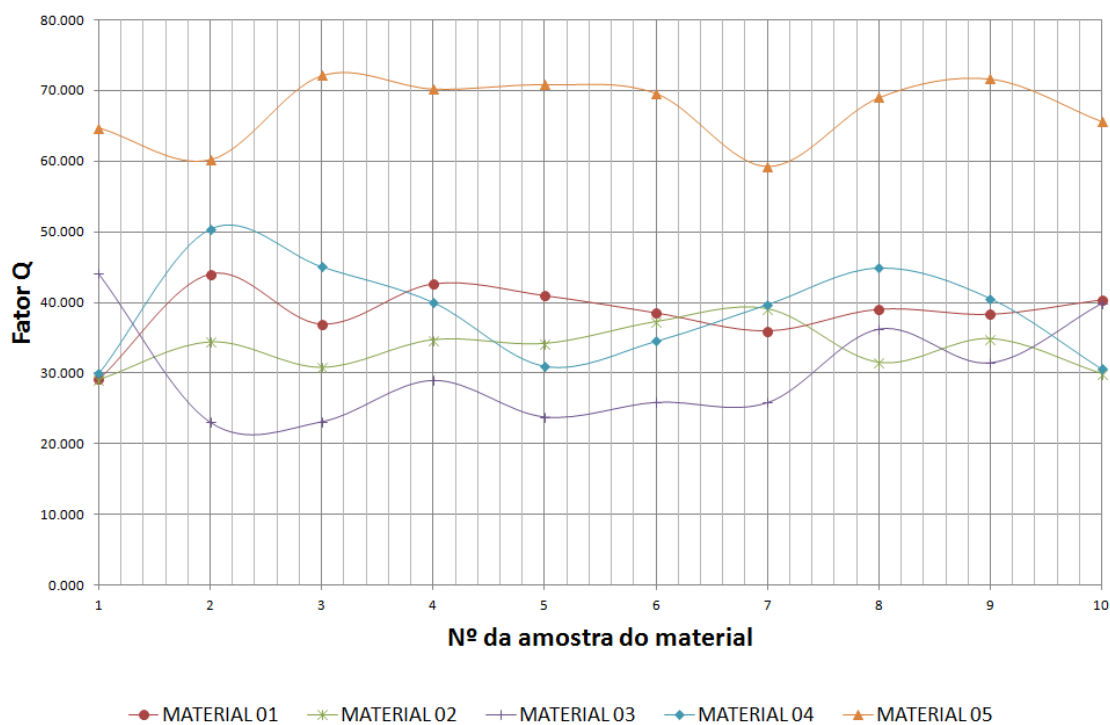


Figura 4.20 – Valor de  $Q$  para as amostras dos materiais de forma de bobina.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

forma da bobina, a média das amostras do mesmo material, onde a densidade encontrada não ultrapassou o limite de  $\pm 3\%$ .

A Figura 4.21 apresenta os valores finais de  $E$  atribuídos para cada um dos cinco materiais utilizados para confecção de bobinas. Estes dados foram importados para a biblioteca de materiais.

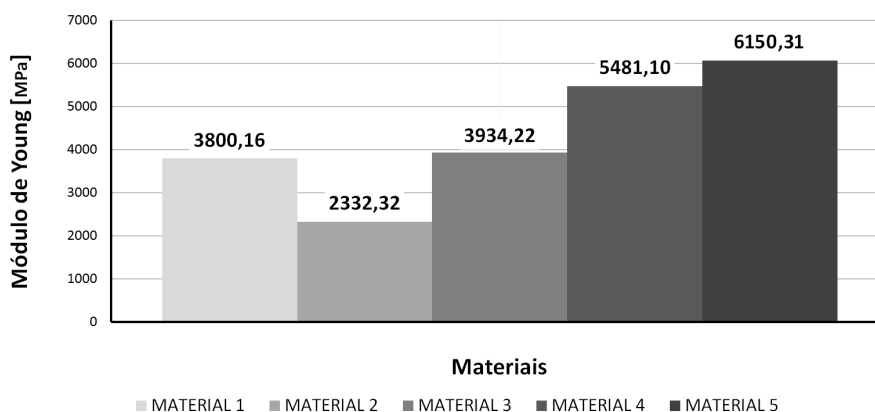


Figura 4.21 – Valor final de  $E$  atribuído para cada material utilizado em forma de bobina.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Da mesma forma como foram apresentados os valores de  $\rho$  para os componentes típicos de um alto-falante, a Figura 4.22 ilustra os valores característicos do módulo de Young  $E$  para

um transdutor tradicional.

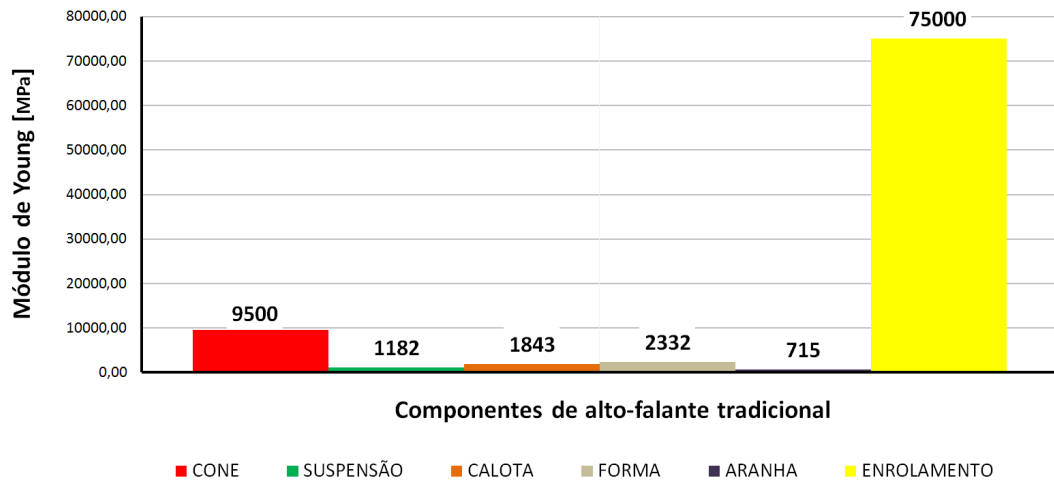


Figura 4.22 – Valor de  $E$  atribuído para cada componente de um AF característico.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

É notória a diferença de valores de  $E$  entre os componentes do transdutor, onde o maior valor está novamente no componente metálico do enrolamento da bobina, neste caso o alumínio. Os menores valores estão para os componentes mais “flexíveis”, que são suspensão e aranha.

Os valores atribuídos como amortecimento para cada um dos cinco materiais na biblioteca de dados seguiram a mesma filosofia. A Figura 4.23 apresenta os valores finais de  $\eta$  para cada material de forma de bobina.

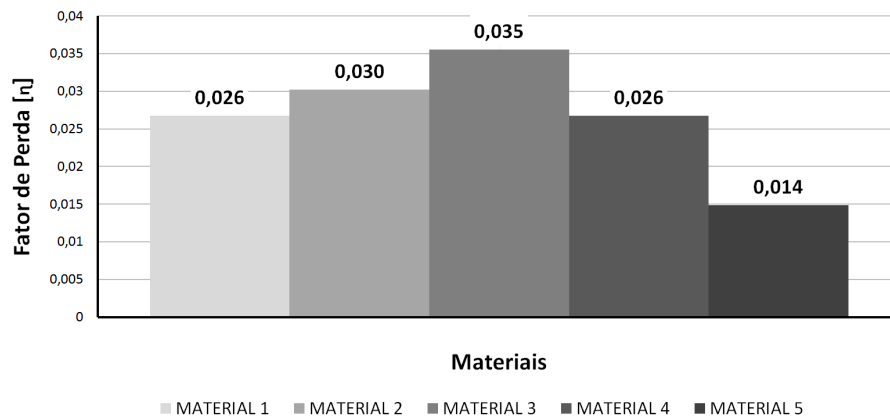


Figura 4.23 – Valor de  $\eta$  atribuído para cada material de forma de bobina.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Concluindo a caracterização das propriedades dos materiais utilizados na forma da bobina, elaborou-se uma tabela com as propriedades agrupadas. A Tabela 4.2 apresenta, então, as propriedades dos cinco materiais demonstrados.

Tabela 4.2 – Parâmetros mecânicos para cinco materiais utilizados em formas de bobinas.

Material	Módulo de Young - $E$ [MPa]	Fator de perda - $\eta$	Densidade $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Material 01	3800,16	0,0267	1475,78
Material 02	2332,32	0,0302	1272,81
Material 03	3934,22	0,0355	1447,39
Material 04	5481,10	0,0267	1673,55
Material 05	6150,30	0,0147	1519,96

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Todos os demais materiais (massas de celulose, plásticos, tecidos com suas respectivas impregnações, borrachas e espumas), que servem como matéria-prima para confecção de componentes de alto-falantes foram caracterizados conforme a mesma filosofia apresentada nesta seção que ilustrou a caracterização dos materiais utilizados para confecção de formas de bobina.

Primeiro foi determinada a densidade ( $\rho$ ) deste material e somente após esta etapa, as demais propriedades de  $E$  e  $\eta$  foram levantadas e determinadas. As propriedades mecânicas encontradas foram analisadas entre si e comparadas, também, com os dados e parâmetros que existem em bibliografias de materiais genéricos, buscando um paralelo para garantir a validade e coerência dos mesmos.

### **Coefficiente de Poisson**

Para os valores do Coeficiente de Poisson, não houve caracterização desta propriedade, pois não haviam equipamentos disponíveis para esta determinação. Com base nos referenciais teóricos e de acordo com a biblioteca de materiais fornecida com o *software* da Loudsoft, foi identificado que para a grande maioria dos materiais, é atribuído o valor de 0,330 e apenas para borrachas é atribuído o valor de 0,480.

Sendo assim, para a pesquisa este método foi adotado, e para materiais diferentes de borracha, o primeiro valor foi aplicado.

Visando apresentar a influência do valor do Coeficiente de Poisson na curva de resposta e sensibilidade do alto-falante, este parâmetro, em dois componentes (cone e aranha) foi alterado. A curva de resposta inicial com os valores da biblioteca de materiais foi então comparada com cada uma das alterações. A Tabela 4.3 apresenta os valores iniciais e os valores atribuídos para cada uma das quatro alterações realizadas.

A influência das alterações propostas pela Tabela 4.3 na resposta de frequência e na sensibilidade do transdutor em questão pode ser conferida na Figura 4.24.

Tabela 4.3 – Alterações do Coeficiente de Poisson nos componentes cone e aranha.

Situação / Alteração	Cone	Aranha
Inicial	0,33	0,33
Alteração_01	0,50	0,33
Alteração_02	0,01	0,33
Alteração_03	0,01	0,50
Alteração_04	0,01	0,01

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

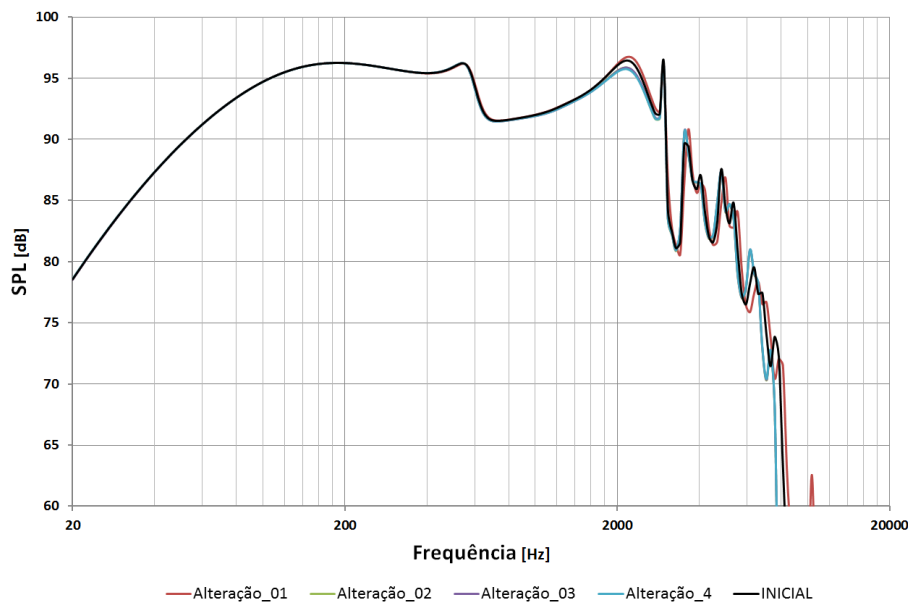


Figura 4.24 – Alterações na curva de resposta devido a mudança do Coeficiente de Poisson dos materiais.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Avaliando as curvas de resposta percebe-se que a influência imposta pelo Coeficiente de Poisson nos materiais cone e aranha não surtiram efeitos significativos que viessem a alterar o formato e o modelo da resposta em frequência do transdutor. Nas alterações propostas, não houve picos ou vales que não fossem previstos no modelo inicial.

## 4.2 Banco de dados para simulações

A solidez de um banco de dados é fundamental para o uso de simulações computacionais confiáveis e com dados satisfatórios, que venham a apresentar os resultados que são encontrados na prática. Um banco de dados vasto e com diversas opções de material, permite ao projetista estudar e verificar diversas opções de combinações para atender aos dados de entrada do projeto.

O Banco de dados de qualquer natureza, ou como geralmente é chamado de *database*

sempre contém informações importantes e, muitas vezes, restritas. Estes dados restritos, podem conter segredos de patentes, propriedade intelectual da empresa e obviamente, dados de pesquisa e novas tecnologias que a indústria pretende lançar. Desta forma, apresentar as propriedades físicas e mecânicas de um material (como a densidade, por exemplo) mesmo sem deixar claro o seu nome comercial ou de referência, pode acabar entregando de qual material tal componente é feito.

É comum atualmente as indústrias contarem com *softwares* de gestão empresarial onde os documentos, registros, tabelas e formulários utilizados ficam à disposição para consulta e edição dos colaboradores. Desta forma, para cada material caracterizado foi gerado um Boletim Técnico deste material, com uma nomenclatura única que o difere entre os outros materiais caracterizados. Sendo assim, por motivos da política interna e da representatividade da empresa onde a pesquisa foi feita, os dados apresentados como exemplo de materiais, tiveram seus nomes alterados. Embora os valores das propriedades tenham sido mantidos os mesmos, a nomenclatura que liga o material ao *database* gerado, foram propositalmente editados.

Criar e manter um *database* com informações válidas é trivial para o sucesso de uma modelagem computacional. Como visto anteriormente, é necessário sempre informar ao *software* de simulação que tipo de material está utilizando na modelagem: borracha ou aço, por exemplo.

#### 4.2.1 Estrutura do banco de dados

O banco de dados utilizou a estrutura e a ferramenta de gestão implantada na empresa, assim, os dados de medição ficam salvos em arquivos únicos, com identificador específico (Boletim Técnico) e de fácil consulta a todos os colaboradores e setores da indústria.

O Boletim Técnico (BT) de cada material, possui as propriedades pertinentes à sua utilização, como exemplo, uma espécie de tecido com sua impregnação, não possui propriedades magnéticas em seu (BT). No primeiro momento, houve a perspectiva de agrupar os materiais conforme a sua utilização em cada componente, porém, não há impedimento em inovar e utilizar um material tradicionalmente de formas de bobina (kapton) em uma calota.

Em contrapartida, no BT de cada material há um campo chamado: *onde é utilizado*:. Este campo, tende a auxiliar o projetista com informações de aplicação deste material em outros produtos da indústria, como exemplo: Celulose-fibra-Longa, é utilizado nos produtos de 12, 15 e 18 polegadas da família *woofer pro* nos componentes cone e calota. Desta forma, espera-se



Tabela 4.4 – Materiais utilizados para confecção de cones e calotas.

Código	Descrição	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\eta$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson
01	Pasta de papel de baixa densidade	3,20x10 <sup>9</sup>	0,030	550	0,33
02	Pasta de papel de média densidade	4,20x10 <sup>9</sup>	0,020	650	0,33
03	Pasta de papel de alta densidade	5,20x10 <sup>9</sup>	0,015	800	0,33
04	Papel Kraft	8x10 <sup>9</sup>	0,010	957	0,33
05	Receita para cone 80 mm	3,70x10 <sup>9</sup>	0,090	700	0,33
06	Receita para cone 100 mm	4,70x10 <sup>9</sup>	0,090	741	0,33
07	Preparo de Kevlar	3x10 <sup>9</sup>	0,025	818	0,33
08	Preparo material rígido	5x10 <sup>12</sup>	0,001	1100	0,33

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

fornecer mais informações ao projetista, facilitando e agilizando o processo de desenvolvimento.

Assim como os demais documentos e registros de uma empresa, tradicionalmente estes documentos são confidenciais, logo o BT não pode ser apresentado na íntegra. Embora o BT criado para cada material não possua nenhuma forma de agrupamento por componente do alto-falante, os materiais apresentados neste item não seguem esta filosofia, ou seja, estão agrupados conforme sua utilização. Tal atitude visa facilitar a interpretação e a comparação entre as propriedades de cada material no mesmo componente.

Portanto, os materiais caracterizados foram agrupados nas seguintes categorias de componentes:

- Materiais utilizados em cones e calotas;
- Materiais utilizados em aranhas e suspensões;
- Materiais utilizados em formas de bobina; e,
- Materiais utilizados em adesivos.

Embora com o agrupamento acima, não haja impedimento de se utilizar tecidos, tipicamente aplicados em aranhas e suspensões, em calotas. Os materiais foram reunidos em grupos onde, sua aplicação é mais expressiva.

É comum no uso da modelagem computacional, informar ao *software* o meio onde, neste caso, o alto-falante está sendo modelado. Tais informações dizem respeito justamente ao ambiente no entorno do alto-falante, sendo informações, por exemplo do “ar” como: temperatura, pressão e umidade relativa.

A Tabela 4.4 apresenta os materiais utilizados para confecção de cones e calotas e suas respectivas propriedades mecânicas.

Como visto para materiais utilizados em cones e calotas, as maiores diferenças de pro-

priedades estão concentradas no parâmetro densidade  $\rho$ . A Figura 4.25 demonstra essa variação apresentada para os 10 principais materiais utilizados nestes dois componentes.

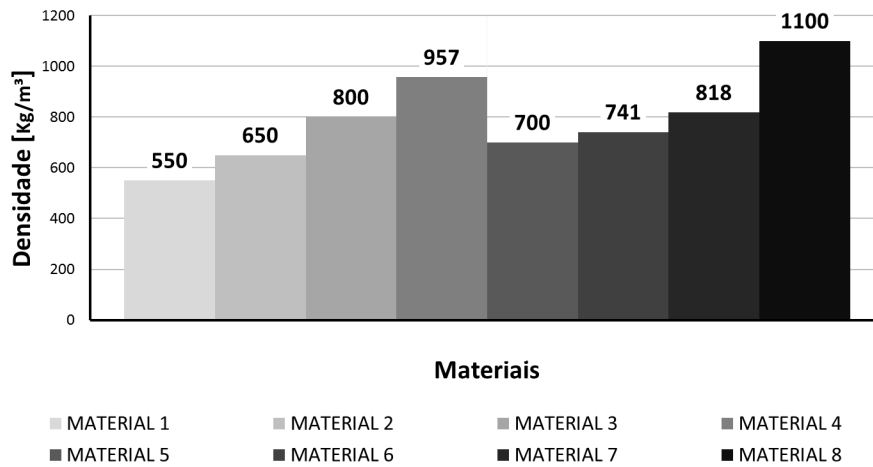


Figura 4.25 – Densidades dos materiais do banco de dados de cones/calotas.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Também pode ser verificada uma relação entre densidade e o fator de perda. Primeiramente são apresentados na Figura 4.26 os valores de  $\eta$  para os mesmos dez materiais de cone e calota.

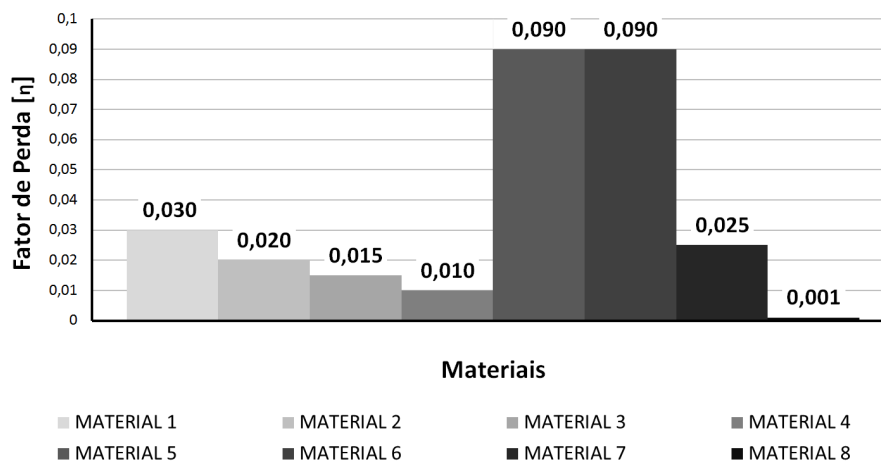


Figura 4.26 – Fator de Perda dos materiais do banco de dados de cones/calotas.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

A relação identificada entre  $\rho$  e  $\eta$  demonstra que, os materiais com maiores valores de densidade, possuem os menores valores de amortecimento com exceção dos materiais 8 e 9, que possuem em sua composição parcelas de Kevlar.

Seguindo para o segundo grupo de materiais, são descritos na Tabela 4.5 os materiais utilizados para confecção de aranhas e suspensões e suas respectivas propriedades mecânicas.

Tabela 4.5 – Materiais utilizados para confecção de aranha e suspensão.

Código	Descrição	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\eta$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson
21	Tecido impregnado – Receita A	$3,80 \times 10^9$	0,025	500	0,33
22	Receita impregnação- suspensão 80 mm	$4,70 \times 10^7$	0,012	406	0,33
23	Receita impregnação- aranha 80 mm	$7,15 \times 10^8$	0,030	334	0,33
24	Receita impregnação- suspensão 100 mm	$1,1 \times 10^7$	0,180	671	0,33
25	Receita impregnação- aranha 100 mm	$1,05 \times 10^9$	0,080	806	0,33
26	Receita impregnação- suspensão 130 mm	$1,2 \times 10^7$	0,250	588	0,33
27	Receita impregnação- aranha 130 mm	$0,5 \times 10^8$	0,100	334	0,33
28	Receita impregnação- aranha 160 mm	$1,5 \times 10^7$	0,120	334	0,33

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Tabela 4.6 – Materiais utilizados para confecção de formas de bobina.

Código	Descrição	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\eta$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson
31	Composto a base de Kapton – A	$5,30 \times 10^9$	0,010	1472	0,33
32	Composto para forma - 80 mm	$1,1 \times 10^{10}$	0,030	3500	0,33
33	Composto para forma - 100 mm	$4,1 \times 10^{10}$	0,030	2510	0,33
34	Composto para forma - 130 mm	$3,1 \times 10^{10}$	0,010	2218	0,33
35	Composto a base de Kapton – B	$3 \times 10^9$	0,025	818	0,33

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Um ponto interessante que merece destaque é o valor de  $E$  nestes materiais, para este tipo de componente, que em relação aos demais materiais, possuem seus menores valores módulo de Young, fazendo com que a compliância predomine.

As chamadas "receitas" de impregnação podem ser consideradas um dos maiores segredos para a indústria, pois além do tipo da resina fenólica, por exemplo, há também a proporção de solvente para a diluição desta resina no tecido. A aranha deve permitir ao sistema móvel realizar excursões e voltar para a posição inicial, uma espécie de memória deste componente.

A Tabela 4.6 apresenta os materiais utilizados, tradicionalmente, para confecção de formas de bobinas e suas respectivas propriedades mecânicas. Estes materiais representam a terceira categoria de componentes.

Atualmente os transdutores, em sua grande maioria, utilizam para junções de seus componentes adesivos. Estes componentes, principalmente, agregam massa ao conjunto. As respectivas propriedades mecânicas dos adesivos podem ser encontradas junto com os fornecedores, uma vez que estes não são fabricados pela indústria de alto-falantes. A Tabela 4.7 apresenta os materiais da quarta categoria, tradicionalmente utilizados, como adesivos no alto-falante.

O *database* é um grupo de informações que está sempre em atualização, ou seja, para

Tabela 4.7 – Materiais utilizados como adesivos no alto-falante.

Código	Descrição	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\eta$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson
41	Composto a base de Epoxy - A	$5 \times 10^8$	0,01	1100	0,3
42	Composto a base de Epoxy - B	$5 \times 10^9$	0,02	1100	0,3

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

cada novo componente criado, mais informação é cadastrada e inserida de banco de dados. Foi verificado que em alguns casos, o processo de fabricação ou conformação do material também interfere nas propriedades finais do material. Por exemplo, na fabricação de aranhas, há os tempos de prensagem e moldagem e alterar estes valores entregam um componente diferente do originalmente proposto. Tal identificação permitiu ver a aplicação da caracterização de materiais, também, no controle de qualidade, o que foi aplicado nas próximas seções.

### 4.3 Intervenção no controle de qualidade

Assim como se busca otimizar os processos de desenvolvimento de produto com novas ferramentas e desta forma reduzir custos, o controle de qualidade também é importante pois consegue evitar retrabalhos e diminuir a ineficiência. Na indústria todas as aplicações possíveis para justificar um novo investimento facilitam a negociação e cálculos de retorno (*payback*).

#### 4.3.1 Garantia de componentes conforme especificação

O alto-falante montado no final da linha de produção pode ser considerado como um agrupamento de componentes, onde a interação de todos estes componentes apresenta como resposta o comportamento do transdutor. Sendo assim, é importante que os componentes sejam fabricados conforme especificações da Engenharia de Produto, pois do contrário, os resultados obtidos com a montagem final, não serão os esperados.

Há uma série de fatores que podem interferir para que o componente montado saia fora das especificações de Engenharia. Obviamente, quanto maior o controle, verificação e aprovações no fluxo de operações da empresa, maior será esta precisão e confiabilidade na produção de seus itens. A Figura 4.27, apresenta de forma macro e sintetizada, os setores envolvidos a partir da equipe de Produto.

Como apresentado, a Engenharia de Produto ocupa a primeira etapa do fluxo, onde cabe a tal setor descrever o material com suas características para o setor de Compras. Nesta mudança

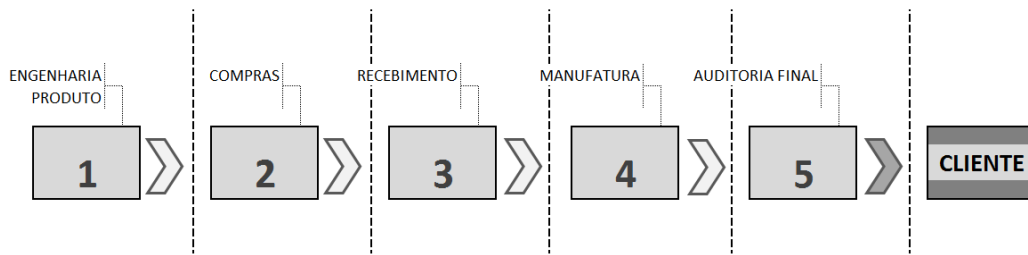


Figura 4.27 – Fluxo em macro para fabricação do alto-falante.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

de setor com a informação do que deve ser comprado, existe a possibilidade de conflito entre o pedido e o entregue. Embora os maiores índices de não conformidades estejam nas próximas etapas, Recebimento e Manufatura, respectivamente.

O estágio de Recebimento, pode não receber ou possuir a matéria-prima adquirida pelo setor de compras, ou até mesmo, ter recebido como tal, algum material similar ou, como é tipicamente chamado na indústria de material, intercambiável ou contraparte. Desta forma, o componente que será confeccionado não terá o comportamento previsto pela Engenharia de Produto, mas mesmo neste estágio, as alterações e não conformidades são mais claras e fáceis de controlar.

Na etapa de Manufatura, parte-se do princípio que a matéria-prima que chega a este nível é realmente a comprada pelo setor de Compras e a solicitada pela equipe de Engenharia. Dentro desta etapa, as alterações que podem afetar a confecção do componente são muito mais complexas quando comparadas aos processos anteriores, pois aqui, os materiais sofrem alterações mecânicas, químicas e por fim, são conformados para a geometria do respectivo componente.

Como exemplo, a Figura 4.28, apresenta também de forma macro, visando preservar a empresa em estudo, o processo de manufatura para fabricação de um componente do sistema móvel, aranha.

Percebe-se que no exemplo de componente do estágio 4, há três etapas a serem realizadas antes da montagem do componente, onde:

- Estágio I: Entrada da matéria-prima no respectivo setor, recebimento e identificação;
- Estágio II: O material recebe a impregnação, sendo suas características alteradas, há depósito de resina sobre o tecido, assim, a densidade do corpo, é alterada.

- Estágio III: Neste estágio o material sofre as conformações necessárias conforme a geometria do projeto. Neste estágio também, a resina que anteriormente foi impregnada ao

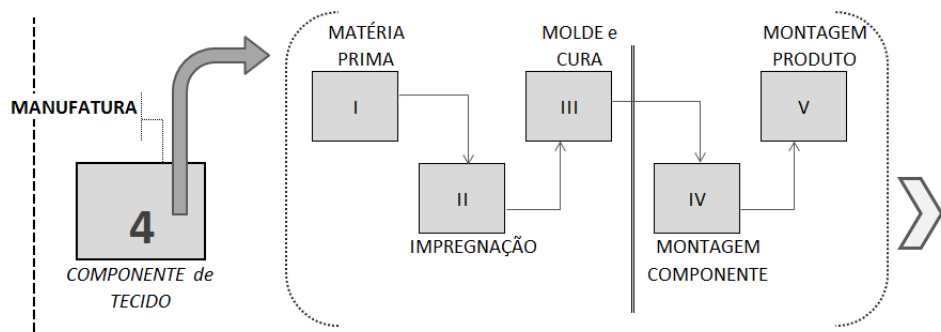


Figura 4.28 – Fluxo de operação para fabricação de componente de tecidos utilizados em AF.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

tecido sofre o processo de cura e cristalização. Tradicionalmente, o tempo de cura em 180 °C é de 15 segundos, na pressão estipulada pelo projeto.

A Figura 4.29 apresenta a comparação entre o tecido bruto e uma impregnação com resina fenólica.

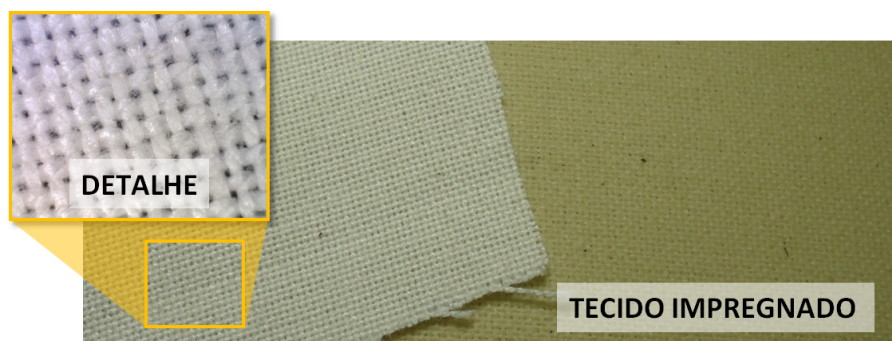


Figura 4.29 – Tecido bruto e com impregnação de resina fenólica.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

A própria impregnação no tecido tem a finalidade de alterar as características do tecido, como visto na Figura 4.29, há a deposição de resina e solvente sobre o tecido bruto. As alterações já começam na cor do tecido após a impregnação. No detalhe, é apresentada a malha e o tecido bruto e todos estes "espaços" a serem preenchidos após a impregnação.

Seguindo com a Figura 4.30 é apresentado em detalhe uma aranha e em vista ampliada as tramas deste componente. Percebe-se que não há espaços e cria-se uma aparência plástica sobre a superfície.

Com o intuito de demonstrar as diferenças entre a malha do tecido bruto e após a sua impregnação, a vista ampliada foi novamente aplicada na Figura 4.31, aqui o tecido final está impregnado e conformado conforme componente acabado.



Figura 4.30 – Tecido moldado conforme componente.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

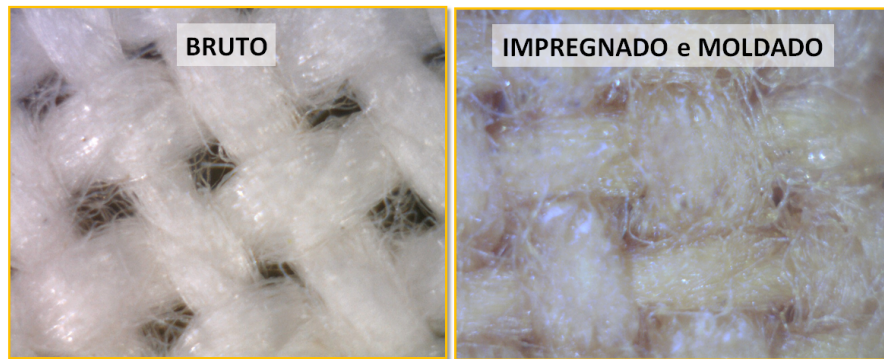


Figura 4.31 – Comparação entre tecido bruto e final.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Ao analisar a Figura 4.31, percebe-se que após a impregnação e cura da resina, o tecido sofre alterações, principalmente na trama dos fios. A resina tende a completar a malha do tecido, este processo, neste caso específico, fez a densidade do tecido aumentar de  $453,20 \text{ kg/m}^3$  para  $608,69 \text{ kg/m}^3$ , um acréscimo maior que 15% apenas neste parâmetro.

O foco da ação proposta em incrementar a qualidade, se deu em garantir que realmente está sendo produzido o componente conforme a especificação. Sendo assim, utilizando este mesmo exemplo de componente, a aranha, é possível verificar três etapas onde a "garantia" de qualidade poderia ser aplicada com utilização de caracterização de materiais.

As três etapas estão apresentadas na Figura 4.32. As duas primeiras estão localizadas na manufatura e nestas ainda é possível utilizar a caracterização como ferramenta de controle de qualidade. Na última etapa o transdutor está montado e esta verificação é feita apenas em um setor final de inspeção, geralmente denominado de Auditoria Final.

Conforme a Figura 4.32, a etapa "A" descreve a entrada do material ou primeiro processo realizado com a matéria-prima. Poderia ser, por exemplo, logo após a impregnação do

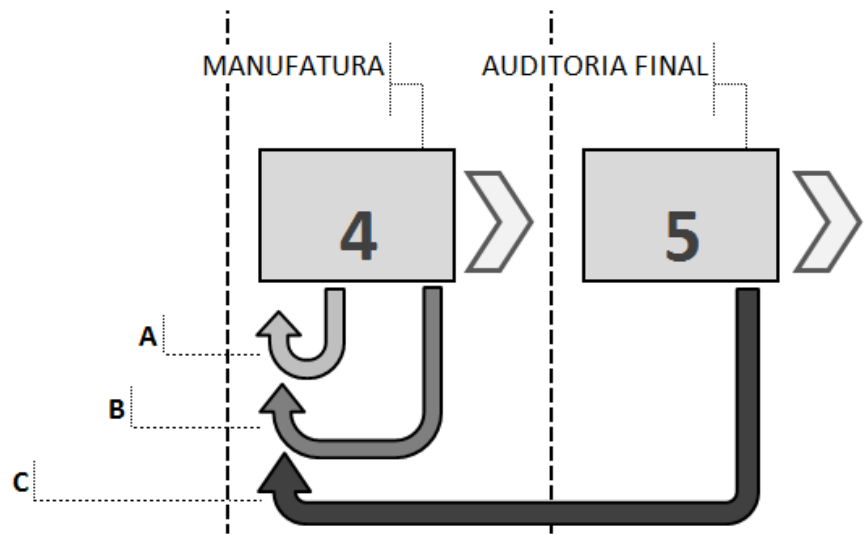


Figura 4.32 – Indicação de processos de verificação de conformidade na fabricação de componentes para AF.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

tecido. Na etapa "B", a verificação pode ser após o processo de moldagem com o componente acabado. Assim, por exemplo, se garantiria que uma aranha tivesse sido construída conforme projeto, mantendo suas características desejadas. Quando a verificação é realizada apenas na Auditoria Final, seria verificado que o parâmetro  $F_s$  estaria fora do especificado e através de uma análise profunda poderia se chegar que um determinado lote de aranha não estava com a compliância correta pois a impregnação não foi realizada conforme procedimento, por exemplo.

#### 4.4 Projeto de alto-falante

O projeto de alto-falantes atualmente utilizado na empresa de aplicação do estudo ocorre, principalmente, através de interações de protótipos, ou seja, parte-se de algum protótipo e, após alteração são realizados novos ensaios, para verificar se os requisitos de projeto foram atendidos. A experiência dos projetistas flui a favor de diminuir a quantidade de protótipos, porém, há projetos onde se tem registro de dez ou mais protótipos montados.

Há situações onde não necessariamente o número elevado de protótipos representa que um projeto está com gastos ou custos elevados, por exemplo: Supondo que se deseja um novo perfil de cone com uma geometria específica, neste caso, qualquer matriz desenvolvida para molde do cone proposto faz com que o valor do projeto cresça exponencialmente. Nestas situações, errar e não atingir o objetivo nas primeiras tentativas costuma ser bastante crítico. Um



exemplo que não agrega alto custo direto aos protótipos, a não ser tempo investido, por exemplo, é alterar a formulação ou "receita" da massa do cone. Neste caso, montar um protótipo com a receita "A" e, após, um com a receita "B" gerou apenas refugo de componente e não gastos com ferramental.

#### 4.4.1 Recursos

Ao engenheiro ou profissional que atua na indústria, cabe conseguir integrar o conhecimento acadêmico com o resultado esperado pela indústria. Esta tarefa de integração da proposta que vem das pesquisas com o produto/solução desejado na indústria, é dificultada, pois na grande maioria das situações, os recursos financeiros disponíveis são pequenos ou limitados e mais do que nunca, o resultado final deve vir logo nas primeiras interações ou protótipos.

No ambiente fabril, costuma-se dizer e ouvir que ao se ter uma ferramenta, deve-se conseguir desta o maior rendimento, ou seja, utilizar ao máximo todas as suas funções. Do contrário, não há necessidade deste investimento e por consequência, dificilmente tal recurso ou ferramenta irá ter o *payback* esperado.

Na indústria de alto-falantes, há basicamente dois grupos distintos onde os recursos de criação estão alocados.

- Recursos para desenvolvimento: Entre as principais ferramentas estão: *softwares* de desenho e simulação computacional (CAD e CAE) e mão-de-obra especializada;

- Recursos para medição e verificação: Instrumentos de medição, laboratórios e câmaras de teste, *softwares* específicos para ensaios.

A diretriz principal do estudo está inserida nos recursos de desenvolvimento, onde se verifica a utilização de simulações computacionais como ferramenta para a criação de novos produtos. Na elaboração e criação de projetos de alto-falantes há novamente duas áreas que podem ser trabalhadas, e aqui cita-se as modeladas computacionalmente, de maneira individual e, no final, agrupadas para obtenção do resultado final, são elas: Modelagem computacional do Conjunto Magnético (CM) e Modelagem computacional do Sistema Móvel (SM). Na Figura 4.33, são apresentadas as regiões que podem ser modeladas individualmente para facilitar o projeto do transdutor.

O primeiro grupo de modelagem computacional, apresentado como região "A" na Figura 4.33, chamado de Conjunto Magnético (CM) em comparação com o segundo grupo, é menos complexo, pois neste item, deseja-se conhecer o fluxo magnético do *gap* do alto-falante.

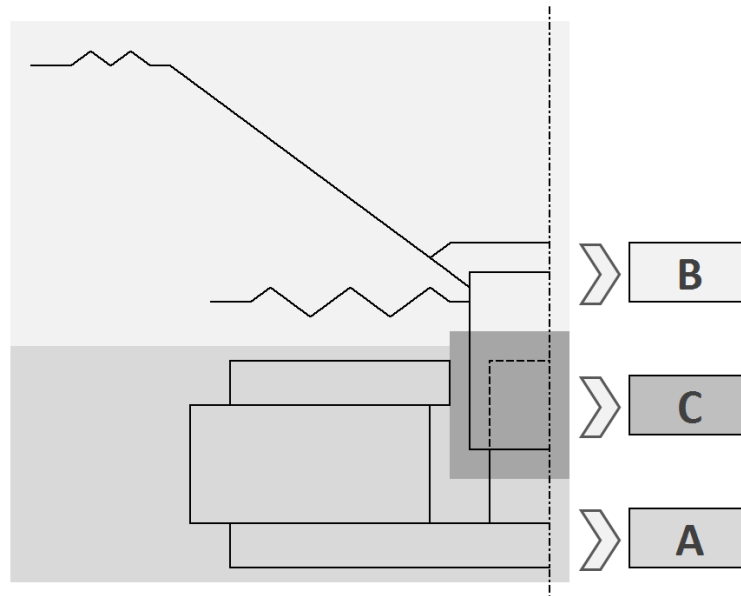


Figura 4.33 – Regiões consideradas para modelagem do alto-falante.  
 Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

A complexidade aumenta no segundo grupo, apresentado como região “B” na Figura 4.33, na realização da modelagem computacional do Sistema Móvel. Nesta modelagem, deseja-se verificar o comportamento e a resposta do alto-falante e de seus componentes para uma determinada entrada. Usualmente, a entrada é uma varredura de frequência, ou na prática denominada apenas de *sweep*, entre as frequências de 20 Hz e 20 kHz. Valores de magnitude, formas de onda e outras condições de contorno podem ser ajustadas, conforme a aplicação e o objetivo final do transdutor modelado. Por fim, na maioria dos casos, deseja-se verificar a Sensibilidade e a Curva de Resposta do alto-falante a 1 W a 1 m.

A região “C” é a área de interação entre o conjunto magnético e o sistema móvel, onde, de posse do valor do fluxo magnético, tem-se o  $\beta$  e com as informações da bobina, que faz parte do sistema móvel, tem-se o  $l$ . Com a multiplicação do  $\beta$  por  $l$ , é encontrado o fator de força do alto-falante, ou o também conhecido como  $\beta l$ , sendo sua unidade em Tm. Na prática, precisa-se dos resultados obtidos da região “A” para iniciar a modelagem do Sistema Móvel, região “B”.

Por fim, os recursos escolhidos para execução das tarefas levaram em consideração as entregas que cada ferramenta pode dar e, o que na indústria é muito visado, o custo para implantação da ferramenta. Dentre os custos agregados para compra de recursos, dependendo da ferramenta, é necessário alocar verbas para treinamentos e certificações para o uso correto e operações confiáveis da ferramenta a ser implantada.

#### 4.4.1.1 Programas computacionais

Quando se trata de simulações computacionais e principalmente de *softwares* de simulação, há um grande número de opções no mercado, para usos gerais e com fins específicos. Para a escolha de qual *software* de simulação computacional deveria ser utilizado no estudo foi realizado um levantamento com base nos valores para compra da ferramenta. Os nomes das ferramentas pesquisadas foram mantidas, porém, o valor em moeda local foi omitido, pois os custos, não são constantes e tão logo estariam desatualizados.

Para fins de comparação foram atribuídas variáveis para demonstrar a proporção de custo entre um *software* e outro. As opções de ferramentas foram divididas em dois grupos, sendo eles: ferramentas de modelagem computacional para aplicações diversas e ferramentas de modelagem específicas para desenvolvimento de alto-falantes. Os *softwares* estão apresentados abaixo conforme a classificação:

- *Softwares* de modelagem computacional para aplicações diversas:

a) ANSYS – As ferramentas propostas pela ANSYS foram pioneiras em aplicações para simulação computacional para fins comerciais. Os *softwares* e pacotes de ferramentas fornecidos pela ANSYS permitem a modelagem computacional de inúmeros problemas de engenharia e física;

b) COMSOL Multiphysics – Esse pacote de *softwares* era conhecido até 2005 como FEMLAB. As ferramentas oferecidas pelo COMSOL Multiphysics têm o objetivo de realizar análises de elementos finitos para diversas aplicações de física e engenharia;

c) PAFEC – A desenvolvedora de ferramentas PACSYS possui diversas opções de *softwares* para modelagem computacional através de elementos fínitos. Embora não possua o reconhecimento global de suas concorrentes, é uma opção com custo relativamente inferior.

- *Softwares* de modelagem específicas para desenvolvimento de alto-falantes:

a) PAFECLS – A desenvolvedora PACSYS implementou uma ferramenta para análise de alto-falantes, conhecida como PAFECLS. Essa aplicação possui uma interface mais simples e intuitiva, porém, a aplicação é limitada apenas para algumas geometrias de cone, suspensão e aranhas pré-definidas no próprio *software*. Apesar dessa ferramenta específica para alto-falantes ter um custo muito inferior ao comparado com *softwares* de simulações diversas, sua limitação quanto à geometria do transdutor restringe sua aplicação;

b) LOUDSOFT – Os *softwares* desenvolvidos pela Loudsoft são específicos para alto-

falantes. Há ferramentas para modelamento do conjunto magnético e, também, para modelagem do sistema móvel, sendo estes os *softwares* FINEMotor e FINECone respectivamente. O custo dessas ferramentas fornecidas pela Loudsoft é também inferior ao custo dos *softwares* de modelagem computacional para aplicações diversas. Embora a ferramenta seja específica para trabalho com alto-falantes, há algumas limitações quanto à geometria do transdutor. Como exemplo, um AF que tenha duas aranhas espaçadas entre si, nessa ferramenta, não é possível inserir esta variação geométrica. A solução proposta é encontrar um "componente equivalente" que seja único, ou seja, colocar no modelo apenas uma aranha e considerar os efeitos que dois destes componentes iriam interferir no modelo.

A Figura 4.34, apresenta em proporções, os valores para aquisição dos *softwares* de modelagem computacional<sup>9</sup>. Os valores foram omitidos de forma proposital, pois os mesmos sempre podem variar de acordo com o fabricante/desenvolvedor.

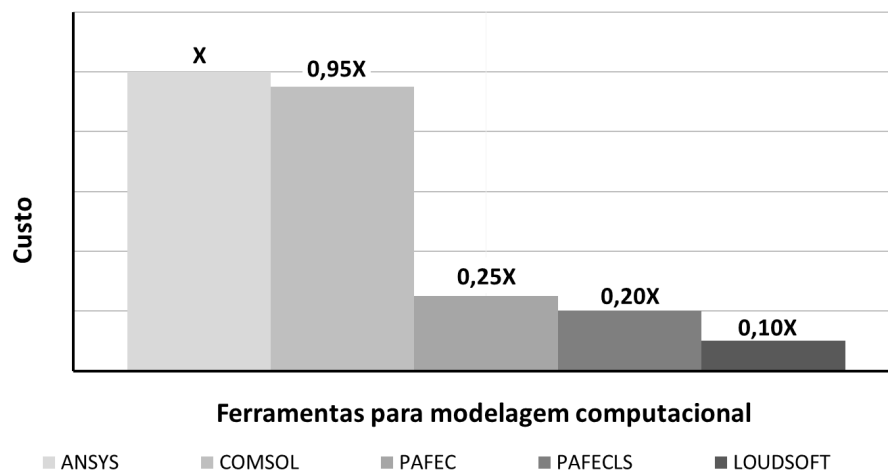


Figura 4.34 – Comparação de custos entre ferramentas CAE.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Embora tanto a ferramenta da ANSYS e como da COMSOL possuam modelos pré-construídos para aplicação em alto-falantes, o custo de implantação é relativamente alto se comparado com os demais concorrentes, e, assim optou-se por utilizar as ferramentas da Loudsoft. A escolha da ferramenta se deu devido ao motivo da Loudsoft oferecer ferramentas específicas para modelagem de alto-falantes e, também, por ter um custo menor, o que para a indústria é fundamental.

<sup>9</sup> O levantamento de custos para aquisição dos *softwares* foi realizado no segundo semestre de 2014.

#### 4.4.1.2 Tempo de projetos

O termo projeto pode ser a nomenclatura para todo o processo de desenvolvimento de produto, ou seja, desde a concepção da ideia pela equipe de Portfólio, ou apenas a etapa de criação do transdutor em si, realizada pela equipe de engenharia de produto para atender as especificações solicitadas.

Nesta seção, o termo projeto estará referenciado ao “desenvolvimento” do produto, ou seja, no momento que a equipe da Engenharia de Produto recebe a entrada de um novo item, até a entrega do alto-falante atendendo todas as especificações técnicas de entrada.

Por convenção e através de análise de históricos de outros desenvolvimentos, é admitido um tempo de projeto de até 12 meses. Este período compreende desde o desenvolvimento dos componentes do alto-falante, montagem do primeiro protótipo, desenvolvimento de ferramental para componentes, ferramental para processo e montagem da peça final para validação.

A Figura 4.35, apresenta as oito etapas principais do desenvolvimento do produto, na indústria de alto-falantes onde o estudo foi aplicado:

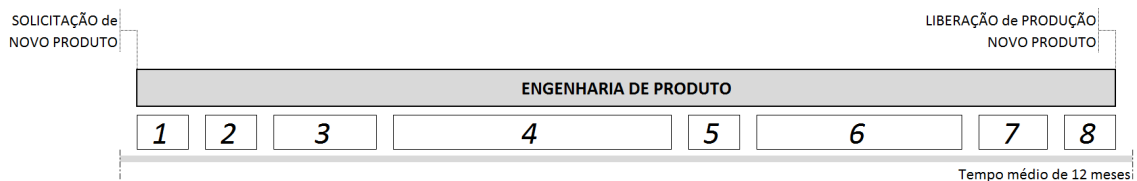


Figura 4.35 – Tempo médio de desenvolvimento de alto-falante e suas principais etapas.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

As descrições das etapas são:

1 – Solicitação de novo pedido com as informações técnicas que o alto-falante deve atender;

2 – Desenvolvimento e projeto dos componentes;

3 – Ferramental para confecção dos componentes;

4 – Elaboração de protótipos;

5 – Validação de protótipo;

6 – Desenvolvimento de ferramental para Processo;

7 – Realização de Lote Piloto de Produção;

8 – Validação de produto novo e liberação de produção.

O processo de desenvolvimento não se restringe apenas a estas oito etapas, há fases

intermediárias entre estas, tais como: Validação de componentes, que está entre as etapas 3 e 4, por exemplo.

Como o processo atual na indústria onde o estudo foi aplicado é através de interação de protótipos, as etapas iniciais tendem a ser as mais demoradas e, por consequência, as mais onerosas, uma vez que, cada protótipo descartado, não trouxe ganho significativo para o projeto final. Vale ressaltar, também, que não apenas o custo dos “componentes” do protótipo quando ele é descartado que deve ser considerado, pois há também o custo do ferramental que produziu este componente, mão-de-obra direta e indireta e outros custos.

Portanto, é nessas fases iniciais que a pesquisa visa interferir, diminuindo o número de protótipos que em alguns projetos pode chegar a 15 versões ou revisões para, no máximo, dois ou três protótipos montados.

#### **4.5 Comparação: protótipos virtuais e reais**

Por segurança e para garantir o cronograma de projetos em andamento, a pesquisa ocorreu em paralelo com outros desenvolvimentos, ou seja, os projetos existentes continuaram a ser desenvolvidos com a interação de protótipos, porém, a inserção da modelagem computacional ocorreu simultaneamente. Desta forma, o Engenheiro de Produto utilizou o método tradicional e a pesquisa foi aplicada a parte, utilizando os mesmos dados de entrada fornecido ao processo atual de desenvolvimento e, por fim, foram comparados os tempos desde a etapa 1 até a etapa 5 apresentadas na Figura 4.35.

Os nomes comerciais dos alto-falantes foram preservados, porém, os transdutores modelados foram apresentados de acordo com seu diâmetro nominal e sua classificação, por exemplo: 12”\_ *midbass*, 12”\_ *woofer* ou 12”\_ *subwoofer* e tabelados, assim, foi atribuído uma nome fictício para cada um destes.

Foram escolhidos cinco projetos de diferentes classificações de alto-falantes que estavam sendo desenvolvidos, com exceção de *driver* e *tweeter*, e estes tiveram seus resultados apresentados e analisados neste estudo. A classificação do transdutor foi de acordo com sua resposta em frequência, o que foi apresentado na Tabela 2.3.

A Tabela 4.8 apresenta o nome atribuído aos cinco transdutores que foram modelados computacionalmente, seus respectivos diâmetros e sua classificação em *subwoofer*, *woofer* ou *midbass*.

Os transdutores utilizados nesta pesquisa foram escolhidos por estarem no cronograma

Tabela 4.8 – Identificação das amostras utilizadas na pesquisa.

Nome atribuído	Diâmetro nominal	Classificação
<i>speaker_A</i>	6	<i>midbass</i>
<i>speaker_B</i>	12	<i>subwoofer</i>
<i>speaker_C</i>	12	<i>subwoofer</i>
<i>speaker_D</i>	12	<i>woofer</i>
<i>speaker_E</i>	12	<i>woofer</i>

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

de desenvolvimento de produto e por cada transdutor possuir alguma peculiaridade em sua geometria ou material. Os critérios de avaliação do produto, tais como sensibilidade e resposta em frequência, utilizados para validar os resultados da modelagem computacional, foram os mesmos utilizados para validar o produto/protótipo montado.

#### 4.5.1 Desenvolvimento através de modelagem computacional

Como apresentado na Figura 4.33, o projeto de alto-falante, tanto através do método tradicional como o proposto na pesquisa inicia-se pela modelagem do conjunto magnético (CM). Os cinco transdutores apresentados na Tabela 4.8 tiveram seus CMs modelados através do *software* de simulação FEMM.

O processo de modelagem inicia-se através das ferramentas de CAD e somente após, inicia-se o uso de *software* CAE. A primeira etapa consistiu em desenhar o conjunto magnético com todos os seus componentes, usualmente as principais diretrizes ao projetar um CM, visando utilizar pouco material bruto e obter o melhor valor de fluxo magnético no *gap* do alto-falante.

O engenheiro responsável pelo desenvolvimento precisa considerar, em seu projeto, o processo de fabricação para as peças que estão em desenho, pois além do custo variar entre um processo e outro, as propriedades magnéticas resultantes de uma placa frontal usinada é diferente do de uma mesma placa frontal feita através de processo de fundição.

As propriedades magnéticas dos materiais utilizados, tanto materiais magnéticos e metálicos, são facilmente encontradas em fornecedores destas matérias-primas, o que torna menos complexo o processo de modelagem. A empresa pode contar com alguma liga específica para os componentes metálicos, o que faz desta composição de material, uma propriedade específica que pode até mesmo ter seu pedido de patente requerida.

Nos transdutores utilizados na pesquisa, não foram abertas as fórmulas e composições

das ligas metálicas, propriedades mecânicas e magnéticas, com o propósito de preservar a propriedade intelectual.

Com o objetivo de apresentar o processo de modelagem, a Figura 4.36 apresenta as três etapas até se obter o valor do fluxo magnético via modelamento numérico.

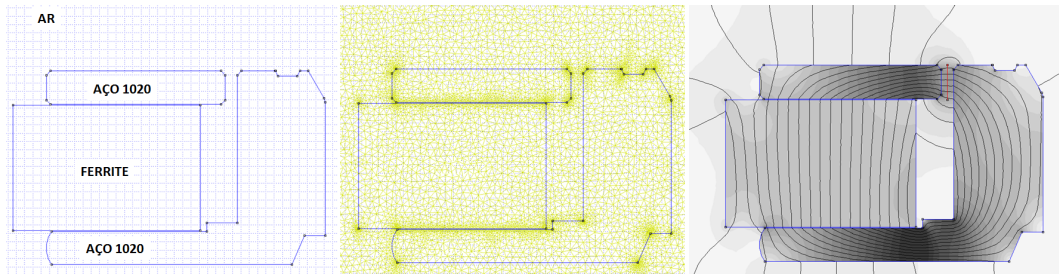


Figura 4.36 – Processo de modelagem do Conjunto Magnético do *speaker\_A*.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

O *software* FEMM, que é um software CAE, trabalha com elementos finitos e a primeira etapa ao inicializar o programa é importar o desenho gerado na ferramenta CAD. Este desenho importado deve ser em escala real e respeitar as dimensões da peça montada ou que se pretende montar.

Na sequência, é indicado ao FEEM quais são os materiais de cada componente do objeto importado e, também, qual é o meio onde o objeto está sendo simulado. Neste caso dos transdutores avaliados, utilizou-se o ar como meio externo.

Com a determinação de cada material, gera-se a malha de simulação, onde quanto mais refinada esta malha, maior a precisão da modelagem e maior o tempo do trabalho computacional para executar a simulação. Cabe então ao engenheiro, validar qual o nível de precisão desejado e qual a velocidade em que se espera obter os resultados.

Após a execução dos cálculos, a ferramenta apresenta as linhas de campo que percorrem as peças do desenho e apresenta também o valor do fluxo magnético em qualquer ponto, ou nó da malha criada anteriormente.

Este valor entregue pelo *software* FEMM pode ser validado com a montagem da peça projetada, magnetização do conjunto magnético e com a medição do fluxo magnético através de um *Gaussmeter*. Todos os CMs dos alto-falantes analisados foram modelados com esta ferramenta CAE e após a simulação, os resultados foram validados com a medição da peça montada.

A Tabela 4.9 apresenta os valores encontrados com o FEMM, os valores medidos com



o *Gaussmeter*<sup>10</sup>, e a respectiva diferença em valores percentuais da diferença entre medido  $x$  simulado.

Tabela 4.9 – Diferença entre valores medidos e simulados na região do *gap* das amostras.

Transdutor	Valor simulado [T]	Valor medido [T]	Diferença %
<i>speaker_A</i>	0,909	0,91	0,10
<i>speaker_B</i>	0,640	0,68	4,00
<i>speaker_C</i>	0,640	0,59	-5,00
<i>speaker_D</i>	1,020	0,92	-10,00
<i>speaker_E</i>	0,921	0,90	-2,10

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Analisando a Tabela 4.9, a maior diferença está na amostra denominada *speaker\_D*, onde o valor medido foi aproximadamente 10 % do valor teórico apresentado pelo *software* FEMM. Do ponto de vista prático é possível verificar também que há uma média entre as diferenças encontradas, o que tende a representar que as propriedades inseridas dos materiais podem estar corretas uma vez que ambos os transdutores consideraram em seus CM o ímã permanente de ferrite e os mesmos metais para peça polar, placas frontais e traseira. Tipicamente, quando os valores em comparações modelagem  $x$  medição variam somente em um sentido, podem indicar parâmetros errados, geralmente nas propriedades dos materiais.

Pode-se considerar este trabalho de modelagem como um processo e então controlar esta tarefa com auxílio das Cartas de Controle. Esta ferramenta denominada de Carta de Controle é uma das Sete Ferramentas da Qualidade e visa acompanhar um processo e verificar, dentre outros objetivos, o quanto controlado e estável é determinada série. Sua utilização é bastante forte em processos de linha de produção. Em acordo com a regra 6 desta ferramenta, se quatro de cinco pontos consecutivos estiverem no mesmo lado da linha central já determinam que o processo não está controlado. Daí então a suposição e a hipótese de que as propriedades e modelagem do CM podem estar corretas, pois as diferenças encontradas seguiram as regras da Carta de Controle. Com um maior histórico pode-se verificar com precisão a eficácia e a aplicação desta ferramenta nesta etapa do desenvolvimento de produto.

A Figura 4.37 visa apresentar estas diferenças encontradas em valores percentuais, nota-se exatamente esta variação onde nos primeiros transdutores a diferença foi positiva e nos finais, a diferença foi negativa.

Apesar da variação observada na Figura 4.37, todas as diferenças encontradas estão

<sup>10</sup> Equipamento para medição do fluxo magnético no *gap* do alto-falante.

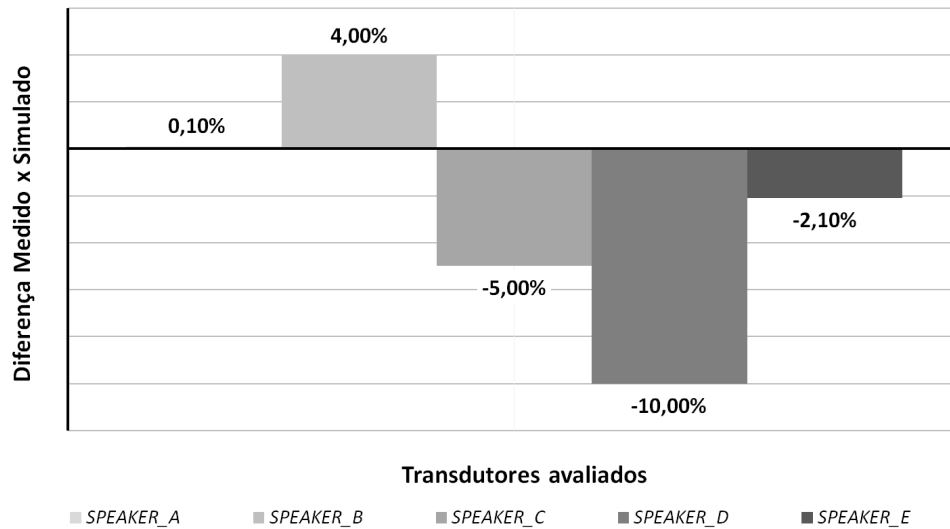


Figura 4.37 – Diferença de valores simulados e valores medidos em cada CM.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

dentro dos limites que são admissíveis no local onde a pesquisa é aplicada. Cada indústria possui seus critérios de avaliação e tolerância para cada item a ser avaliado. Certamente se uma empresa possui seus processos muito bem controlados, esta faixa de valores pode ser menor.

Entretanto, há caso onde devido a todas as variáveis do processo em si, desde a compra da matéria-prima, o recebimento e o processo de montagem a complexidade é tamanha que é possível considerar que limites desta grandeza também sejam permitidos. Portanto, valores de tolerância em seus processos de fabricação são critérios que cabem apenas à empresa decidir, uma vez que estão ligados diretamente também à qualidade do produto final.

Esta primeira validação, comparando o valor do fluxo magnético modelado com o real, permite avançar para a região descrita na Figura 4.33 como região “C”. Esta área é a interação da bobina com o fluxo magnético no *gap*. Esta interação é denominada de Fator de força do alto-falante, ou apenas de parâmetro  $\beta l$ . Este parâmetro é utilizado para encontrar e determinar os já vistos parâmetros de Thiele-Small.

Na Figura 4.38 esta região “C” é apresentada com destaque. Apesar da concentração de fluxo ser maior no *gap*, todo o enrolamento acima e abaixo do *gap* também está sobre influência das linhas de campo do franjeamento.

O Conjunto magnético da Figura 4.38 é o respectivo CM da amostra denominada *speaker\_E*, é possível verificar que há uma diferença entre as alturas da placa frontal (AFA) e altura do enrolamento. O valor do fluxo magnético que deve ser considerado para o produto  $\beta l$ , é a média dos valores ao longo de toda a altura do enrolamento, o que pode ser facilmente

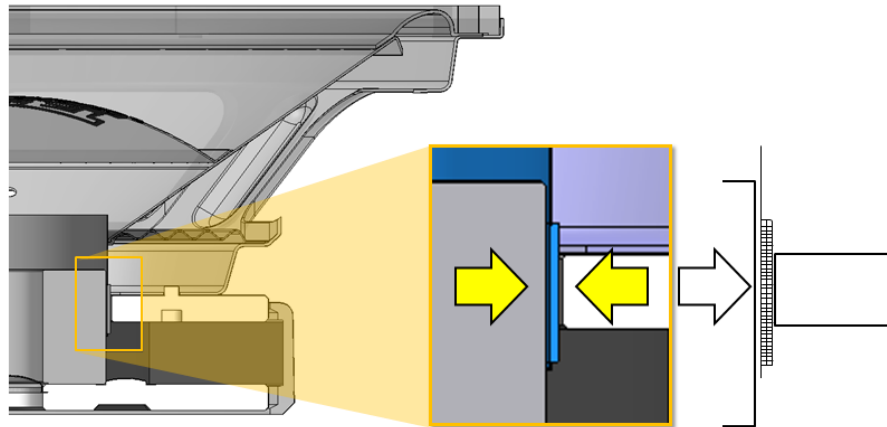


Figura 4.38 – Interação de bobina e conjunto magnético.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

visualizado na Figura 4.39, que representa o CM da Figura 4.38 e o posicionamento da bobina, esta indicada na linha em cor vermelha desta mesma imagem.

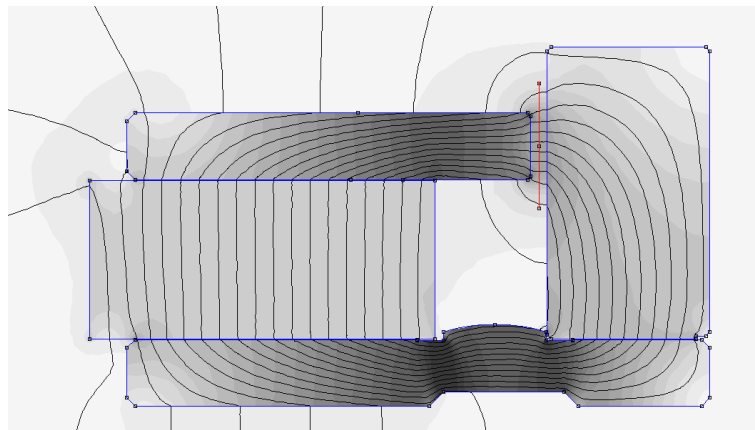


Figura 4.39 – Linhas de campo no CM e na bobina do *speaker\_E*.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

O valor de fluxo magnético apresentado na Tabela 4.9 para a amostra *speaker\_E* é o valor referente, exclusivamente, ao fluxo magnético do *gap*. A altura que é considerada para o *gap* é a mesma altura da placa frontal do transdutor onde nesta área a concentração das linhas de campo é maior. Entretanto, o fluxo magnético considerando toda a altura do enrolamento da bobina é consideravelmente menor, como apresentado na Figura 4.38, percebe-se que a concentração de linhas de campo diminui conforme se distanciam do *gap*.

A Figura 4.40 apresenta a dispersão do fluxo magnético ao longo do comprimento do enrolamento da bobina do *speaker\_E*. Neste transdutor, a altura do enrolamento é de 15 mm e a altura da placa frontal / AFA é de 8 mm. O projetista procura manter a concentricidade entre o enrolamento e a AFA, buscando assim, a simetria de fluxo magnético na bobina.

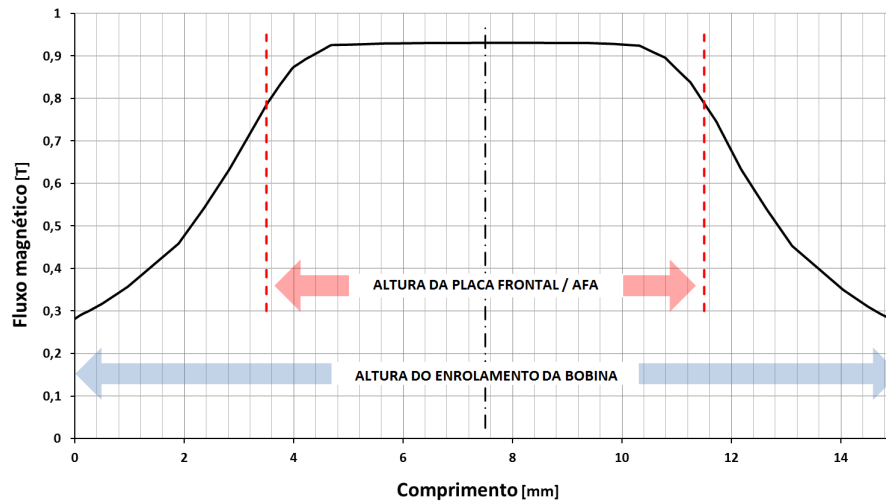


Figura 4.40 – Dispersão do fluxo ao longo do enrolamento da bobina do *speaker\_E*.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Com a análise da dispersão do fluxo magnético no enrolamento da bobina, fica perceptível que a maior concentração das linhas de campo e assim, maior valor de fluxo magnético ao longo da bobina, está na região do *gap*. A Tabela 4.10 apresenta a diferença entre os valores de fluxo magnético no *gap* e o valor médio ao longo do enrolamento da bobina da amostra *speaker\_E*.

Tabela 4.10 – Diferença entre valores medidos e simulados no *gap* / enrolamento.

Transdutor	Fluxo no <i>gap</i> [T]	Fluxo no enrolamento [T]	Diferença %
<i>speaker_E</i>	0,921	0,697	-22,4

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Percebe-se que a diferença é considerável entre o fluxo no *gap* e em todo enrolamento e este valor tende a ser maior caso a altura do enrolamento da bobina seja ampliada, uma vez que, as linhas de campo ao se afastar do *gap* também estão mais dispersas, como pode ser visualizado na Figura 4.39.

A altura do enrolamento da bobina de um alto-falante é determinada, basicamente, pelo deslocamento do sistema móvel que se deseja ao transdutor. Para obter um ótimo fator de força é preciso um alto valor de  $\beta l$ , o valor de  $\beta$  foi encontrado com o FEMM, e  $l$  é o comprimento, em metros, de fio imerso neste campo. O projetista ao calcular a bobina do alto-falante, além de sempre procurar o maior valor possível de  $\beta l$ , deve considerar que aumentar demasiadamente o  $l$  faz, também, o parâmetro  $Re$  da bobina subir. Em contra partida, para compensar o aumento do valor de  $Re$ , pode-se aumentar a espessura do fio, o que diminuiria o  $Re$  mas permitira

agrupar menores quantidades ou metros de fio na mesma altura de enrolamento.

Outra diretriz que é seguida pelo projetista é referente à potência elétrica que o transdutor deverá suportar, pois potência elétrica está fundamentalmente ligada à espessura do fio condutor utilizado na fabricação da bobina. O conjunto magnético também é responsável pela potência elétrica de um alto-falante, porém sua participação é menor, uma vez que seu objetivo analisando a transferência de calor, é apenas para contribuir para a dissipação térmica.

Seguindo com o exemplo do transdutor *speaker\_E*, este possui bobina de 60.35 mm de diâmetro, a altura do enrolamento da bobina é de 15 mm e o valor projetado do  $Re$  de  $3.3 \Omega$  de resistência. Para atingir este valor, foram necessárias 72 espiras ao entorno da bobina e estas foram divididas em duas camadas para atingir o limite da altura do enrolamento. Desta forma o valor de  $\beta l$ , neste exemplo foi calculado conforme Equação 4.1.

$$\beta l_{\text{calculado}} = \frac{2\pi r}{1000} N_{\text{espiras}} \beta_{\text{enrolamento}}, \quad (4.1)$$

onde:  $r$  é o valor do raio da bobina,  $N$  é o número de espiras total do enrolamento e  $\beta$  é o valor do fluxo magnético na região onde a bobina estará posicionada no conjunto magnético.

A Tabela 4.11 apresenta a diferença entre os valores calculados e medidos de  $\beta l$  para a amostra *speaker\_E*.

Tabela 4.11 – Diferença entre valores medidos e simulados de $\beta l$			
Transdutor	$\beta l$ Calculado [Tm]	$\beta l$ medido [Tm]	Diferença %
<i>speaker_E</i>	9.51	9.5	0.1

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Para medição do  $\beta l$  no *speaker\_E* e nas outras amostras foi utilizado o equipamento da Klippel com o módulo específico para parâmetros de Thiele-Small, o *Linear Parameter Measurement-* (LPM), onde este módulo considera a interação entre o  $\beta$  e o  $l$  com os demais parâmetros do alto-falante. As variações encontradas ao confrontar os valores calculados e medidos do fator de força, em todas amostras, permaneceram dentro dos limites considerados aceitáveis.

De posse dos resultados obtidos através da modelagem nas Regiões “A” e “C” da Figura 4.33, inicia-se a modelagem do Sistema Móvel (SM), Região “B” da mesma Figura. A complexidade da modelagem do SM aumenta consideravelmente em relação à Região “A”, até mesmo porque este não é um grupo “estático” como o CM. Como visto, a ferramenta utilizada

para modelagem do sistema móvel são os *softwares* da empresa Loudsoft que conforme a Figura 4.34, apresentam o menor custo em relação aos demais concorrentes e são desenvolvidas, especificamente, para trabalho com alto-falantes.

Novamente aqui, a primeira etapa para a modelagem é o desenho da geometria através de uma *software* CAD. Nesta etapa as informações mais importantes do alto-falante são definidas, tais como: formato de suspensão, aranha, cone, calota e suas respectivas espessuras. Na etapa de desenho do alto-falante, o tipo de material utilizado para fabricação do cone, por exemplo, não é relevante, pois neste momento deve se considerar as dimensões, a geometria e a espessura. As propriedades mecânicas, dos materiais são inseridas após a geometria estar definida diretamente no *software* CAE, neste caso, no Loudsoft. Todas as amostras descritas na Tabela 4.8 tiveram seu Sistema Móvel (SM) modelado e comparado com os valores medidos com o protótipo montado. Nesta etapa, é fundamental a caracterização dos materiais utilizados nos componentes do alto-falante, pois, além da geometria do transdutor é modelado o formato da curva de resposta.

Os dados de entrada para um novo produto, oriundos da equipe de portfólio descrevem as diretrizes e parâmetros nos quais o protótipo montado e, neste caso, modelado serão comparados e validados. É comum que cada transdutor desenvolvido tenha os seus “dados de entrada”, ou seja, as suas respectivas características. Há casos também onde a única diferença de dado de entrada, entre um produto e outro, seja o parâmetro custo, desta forma, geralmente, se busca uma redução de custo em um produto já concebido. Sendo assim, a Tabela 4.12 apresenta as especificações requeridas para o produto *speaker\_A*.

Tabela 4.12 – Dados de entrada *speaker\_A* – Valores solicitados.

Parâmetro	Valor do atributo
Sensibilidade	85 dB
Resposta em Frequência	72 Hz a 4000 Hz
Potência	140 W
Impedância	4 Ohm
Custo	—

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Nesta etapa de modelagem do sistema móvel, busca-se atender a dois requisitos do produto solicitado. Estes parâmetros são a Sensibilidade e a Resposta em Frequência. Para exemplificar e utilizar os dados da Tabela 4.12, a Figura 4.41 apresenta as curvas de resposta do alto-falante *speaker\_A* e as indicações destes dados de entrada.

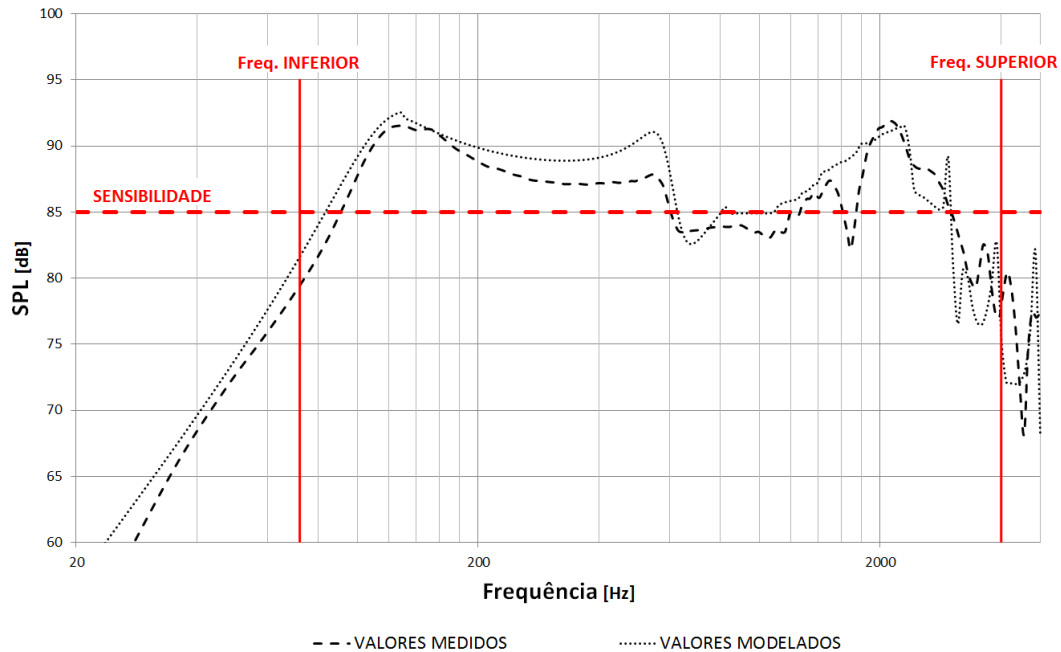


Figura 4.41 – Indicação da sensibilidade e resposta em frequência de um AF na curva de resposta.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

É esperado da equipe de engenharia que se atenda, no mínimo, aos valores propostos nos dados de entrada. Entretanto, quando os valores encontrados ficam além do solicitado, geralmente, não há problemas, pois se tem um alto-falante tecnicamente melhor do que foi proposto. Esta variação “para mais”, tende a carregar e, também, a elevar o parâmetro custo, que, de certa forma é o mais importante para a indústria. A Figura 4.42 apresenta a região onde os dados solicitados de sensibilidade e resposta em frequência estão inseridos, ou seja, a área destacada em vermelho, para este produto, não pode ser inferior à proposta.

Na Figura 4.42, percebe-se, também, para quais direções cada parâmetro pode sofrer alterações. Avaliando a sensibilidade, esta margem de trabalho pode sofrer alterações para cima, ou seja, qualquer valor de sensibilidade superior ao proposto, no caso do *speaker\_A* que é de 85 dB é aceitável, mantendo e atingindo o custo proposto é excelente, pois este parâmetro está diretamente ligado ao volume sonoro do som que é reproduzido pelo transdutor.

Avaliando a resposta em frequência, quanto maior for esta banda, também é mérito do projetista, pois esta largura de banda indica que o transdutor pode operar, mantendo a sensibilidade solicitada em uma maior faixa de frequências.

Neste parâmetro, a frequência inferior pode ser menor do que o solicitado e o oposto cabe à frequência superior, este valor pode ser superior ao solicitado, aumentando assim a banda

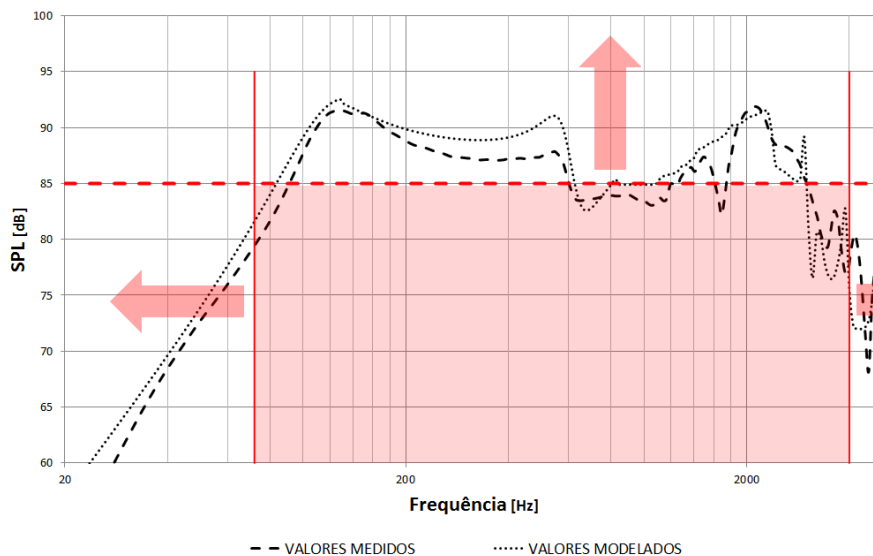


Figura 4.42 – Região de especificação do alto-falante.  
 Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

de frequência de resposta. Seguindo com o exemplo do *speaker\_A*, a Figura 4.43 ilustra as curvas de resposta encontradas através da modelagem computacional e da medição do protótipo final. São também apresentados os respectivos valores de sensibilidade para cada situação.

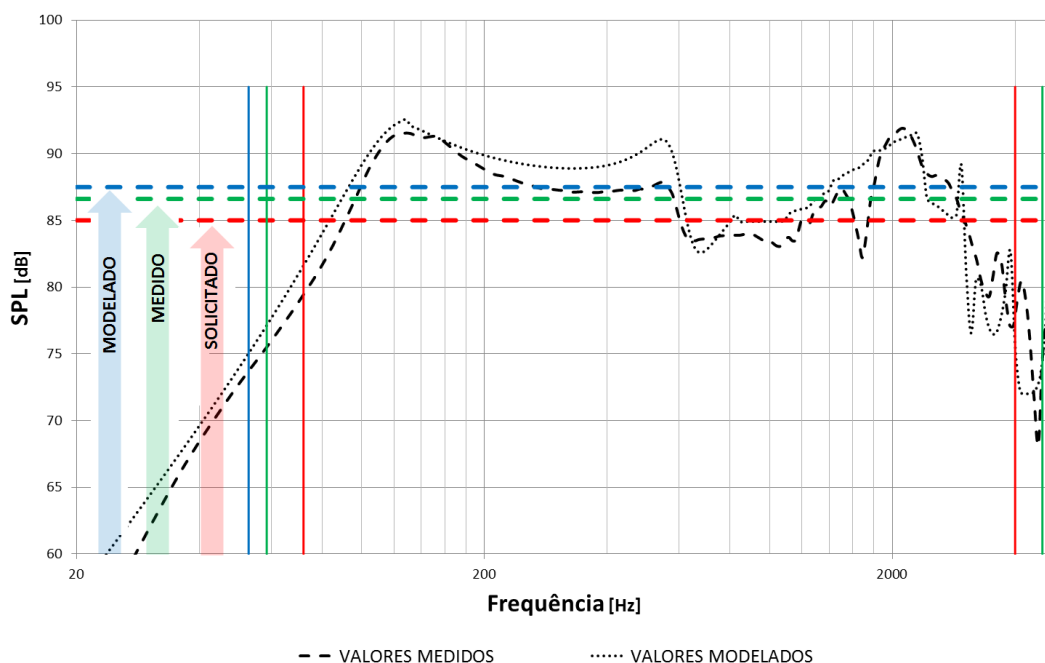


Figura 4.43 – Comparação dos valores de sensibilidade encontrados para o *speaker\_A*.  
 Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Analisando a Figura 4.43 conclui-se que ambos os valores do protótipo montado e do valor encontrado através da modelagem computacional estão além do dado de entrada e assim, conforme com o que foi solicitado. Embora os valores de sensibilidade encontrados em ambas



ocasiões (montado x modelado) atendam ao *input* solicitado, são visíveis as diferenças de amplitude entre as duas curvas da Figura 4.43, porém, é visível também, que ambas, de maneira geral, possuem o mesmo formato (tradicionalmente chamado de *shape*). Pode-se sim, aceitar estas diferenças de amplitude, uma vez que os valores finais que são os dados de *output* atendem ao que é solicitado. Para aceitação é o típico caso de aplicação do critério: passa / não-passa ou do atende / não-atende. Essa maturidade e confiança na ferramenta (modelagem computacional) é inserida gradualmente com a utilização do recurso, com a criação de histórico de simulações e, principalmente, com a validação do virtual com os protótipos montados.

Entretanto, essas diferenças podem ser reduzidas com o refinamento do modelo. As diferenças podem ser atribuídas a diversos fatores, tais como: erro da determinação das propriedades dos materiais, erro na geometria do transdutor, limitação do *software* CAE ou, até mesmo, erros de medição do protótipo montado. Mais uma vez, os resultados do modelo numérico atendem aos requisitos de entrada e apresentam coerência com os valores medidos no protótipo real. Existe sim, a oportunidade de refinar e buscar diminuir estas diferenças de amplitudes, porém, considera-se este primeiro passo, até mesmo porque, com um maior histórico o processo de identificação de falhas no modelo tende a ficar mais simplificado.

A mesma situação é encontrada na Figura 4.44 onde é avaliada a resposta em frequência. Novamente os valores reais (medidos) e modelados estão além do solicitado no projeto, o que mais uma vez preenche os requisitos solicitados.

Dentre os cinco requisitos ou dados de entrada para o projeto de transdutores, os mais complexos e, talvez, os mais procurados (importantes) são Sensibilidade e Resposta em Frequência, respectivamente. O parâmetro Potência é algo, que está ligado mais diretamente com a capacidade de condução de corrente elétrica pelo fio do enrolamento. Da mesma forma como a impedância está direcionada para os valores comerciais disponíveis para ligação em amplificadores de potência. Não há dúvidas de que estes dois últimos critérios também interfiram na curva de resposta, e, por consequência, da Resposta em Frequência, e na Sensibilidade do transdutor, seja através da indutância do enrolamento, através do Re da bobina ou, até mesmo, pela densidade dos materiais que, acrescentam massa ao sistema móvel.

Para finalizar e facilitar a comparação entre os dados, a Tabela 4.13 descreve os valores encontrados através da medição do protótipo final e da modelagem computacional do *speaker\_* A .

Os dados obtidos através da simulação ficaram de acordo com o solicitado e compa-

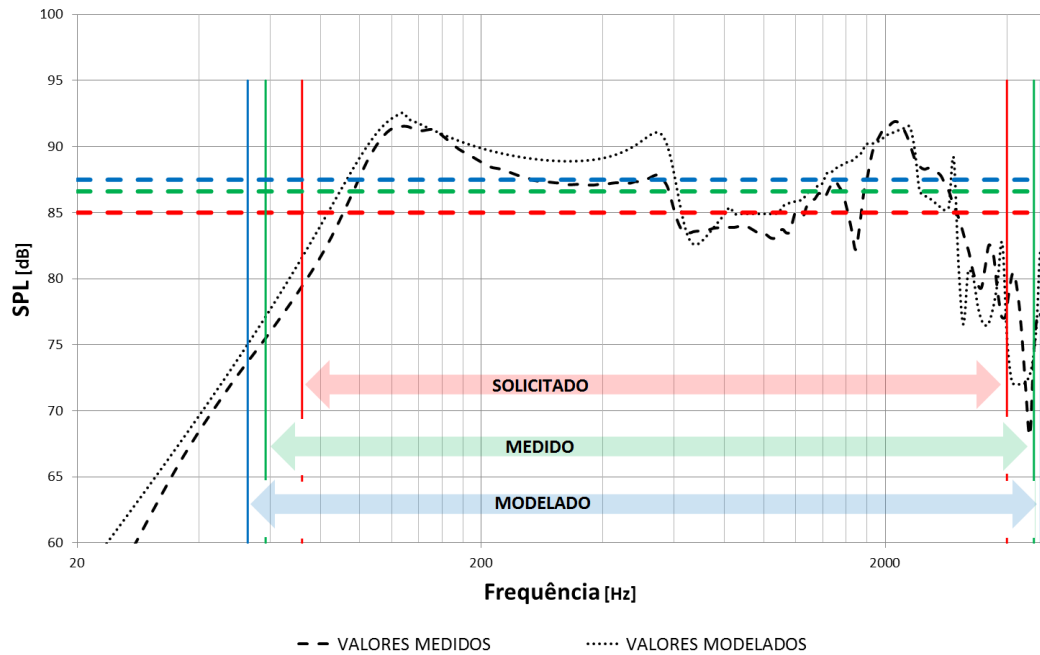


Figura 4.44 – Comparação dos valores da banda de frequência encontrados para o *speaker\_A*.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Tabela 4.13 – Dados de saída *speaker\_A* - Comparação

Parâmetro	Valor do atributo - MEDIDO	Valor do atributo – MODELADO
Sensibilidade	86,6 dB	87,5 dB
Resposta em Frequência	58,5 Hz a 4664 Hz	52,8 Hz a 4863 Hz
Potência	140 W	140 W
Impedância	4 Ohm	4 Ohm
Custo	—	—

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

rados com os valores medidos no protótipo da amostra *speaker\_A* verifica-se proximidade. Outro ponto importante é a semelhança entre as curvas de respostas, que, apesar de diferenças de amplitudes era esperado uma vez que este é um dos objetivos do uso de modelagem computacional.

Esta mesma metodologia de modelagem e verificação foi aplicada para as demais quatro amostras de alto-falantes, que foram apresentadas inicialmente na Tabela 4.8 e em nenhuma das situações os critérios solicitados não foram atendidos.

Ainda com a modelagem computacional pode-se verificar o comportamento do sistema móvel para cada valor de frequência. Isto permite, por exemplo, corrigir vales e picos indesejados na curva de resposta e também prever futuras falhas que possam vir a ocorrer no transdutor.

Com base na Figura 4.45 pode-se verificar a existência de um vale na curva de resposta

do transdutor *speaker\_D*. Esta variação na resposta do transdutor é apresentada no arquivo obtido através da modelagem computacional e também no protótipo medido.

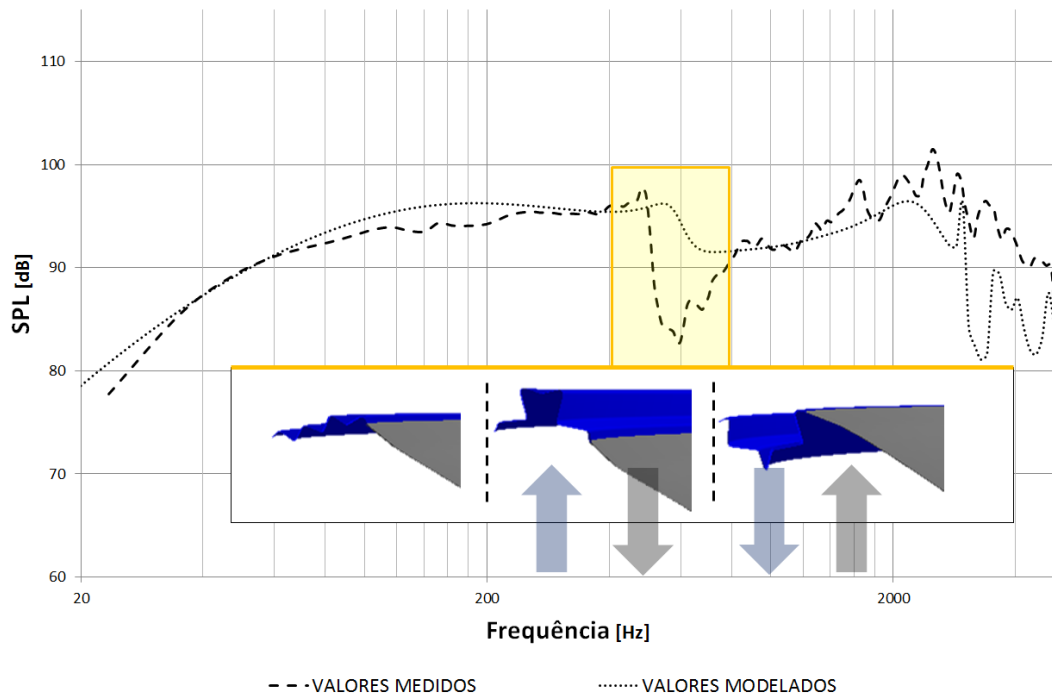


Figura 4.45 – Inversão de fase entre componentes cone-suspensão no *speaker\_A*.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Essa inversão de fase é responsável pelo vale apresentado em ambas as curvas de respostas. No detalhe é possível ver que o cone está se movendo no sentido positivo, ou seja, para cima, e a suspensão, no sentido negativo. Nesta frequência, um componente sempre está no movimento oposto ao outro.

Com a varredura e com a utilização do *scanner* 3D do sistema móvel ao ajustar este valor defrequência, é possível ver este comportamento indesejado entre cone e suspensão no protótipo montado. Esta verificação está apresentada na Figura 4.46.

A possibilidade de identificar o comportamento do sistema móvel ao longo da frequência permite ao engenheiro de produto conhecer com riqueza o funcionamento do alto-falante. Porém, para propor soluções a algum comportamento indesejado, um novo protótipo precisa ser montado. Montagem de protótipos, mais uma vez, acarreta custos e tempo ao desenvolvimento.

Com a ferramenta CAE, o mesmo comportamento pode ser visto no *software* de simulação, a oposição de movimentos, nesta mesma frequência, é clara e agora, com o sistema modelado, alterações podem ser feitas para atenuar este vale ou para deslocá-lo para uma região fora da resposta de frequência. A Figura 4.47 apresenta essa defasagem vista no modelo virtual.

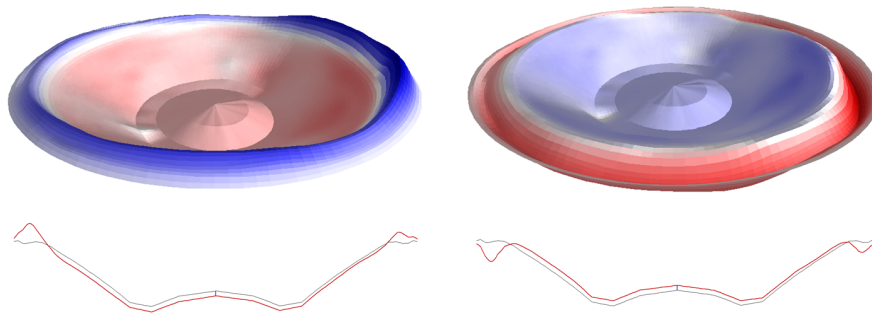


Figura 4.46 – Identificação através da medição de varredura 3D do sistema móvel do *speaker\_A*.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

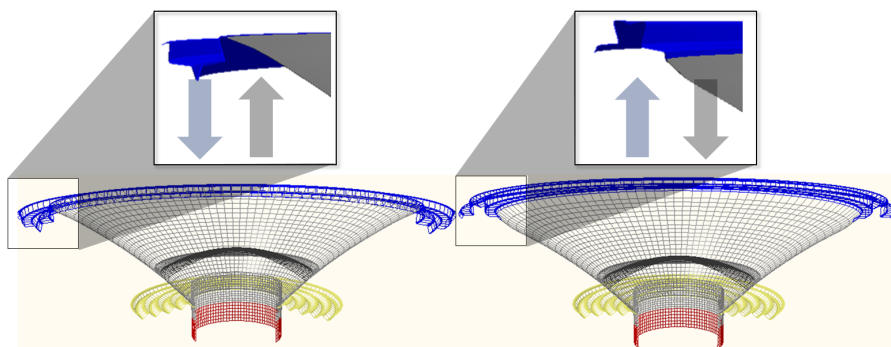


Figura 4.47 – Identificação da inversão de fase no modelo computacional do *speaker\_D*.

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Logo, a utilização de programas para modelagem computacional pode também auxiliar o engenheiro de produto a corrigir problemas e, desta forma: ver o comportamento, propor solução e apenas após a certeza de resolução montar protótipos reais. Esta nova possibilidade de utilização dos *softwares* de modelagem é mais um motivo para o investimento na ferramenta e aplicação na indústria de AF.

Conforme apresentado na Figura 4.47, o vale existente na frequência de 500 Hz é gerado devido a inversão de fase entre o cone e a suspensão. Para correção deste comportamento não desejado, uma das alternativas é alterar a geometria da suspensão. A Figura 4.48 apresenta a geometria inicial e dois novos formatos para suspensão do *speaker\_D*.

Após, o desenho da nova geometria da suspensão no *software* CAD, pode-se aplicar este novo formato de componente na ferramenta CAE e avaliar os resultados sem a necessidade de montagem de protótipos. Na prática as alterações de geometria tendem a apresentar maiores mudanças na curva de resposta do que a simples troca de material do componente. Em ambas as situações (troca de geometria ou mudança de material) a montagem do protótipo pode ser

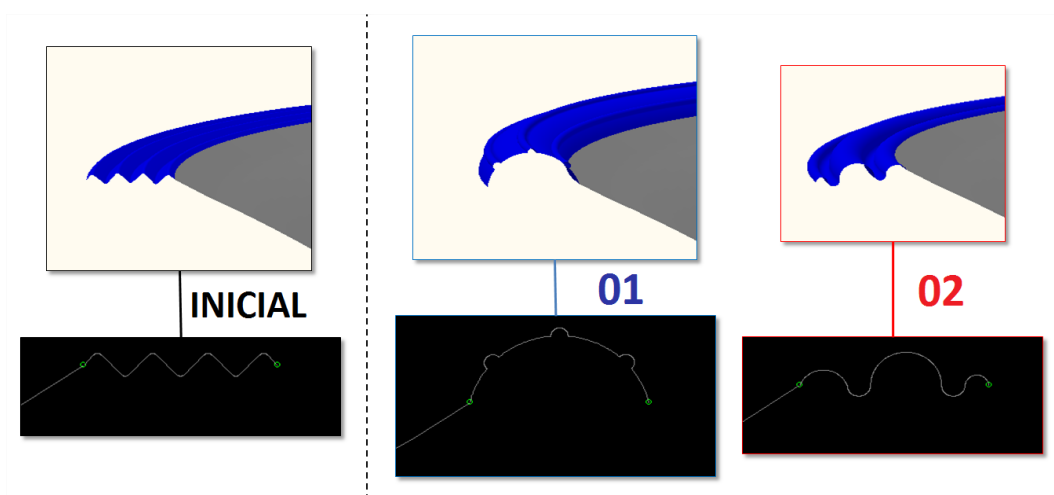


Figura 4.48 – Novas geometrias e formatos propostos para suspensão do *speaker\_D*.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

realizada apenas quando houver ciência dos resultados que serão obtidos.

A Figura 4.49 apresenta a as alterações impostas na curva de resposta da amostra *speaker\_D*, onde, no gráfico, foram mantidos os valores medidos e os valores modelados com a suspensão original e as duas novas geometrias, indicadas como "1" e "2".

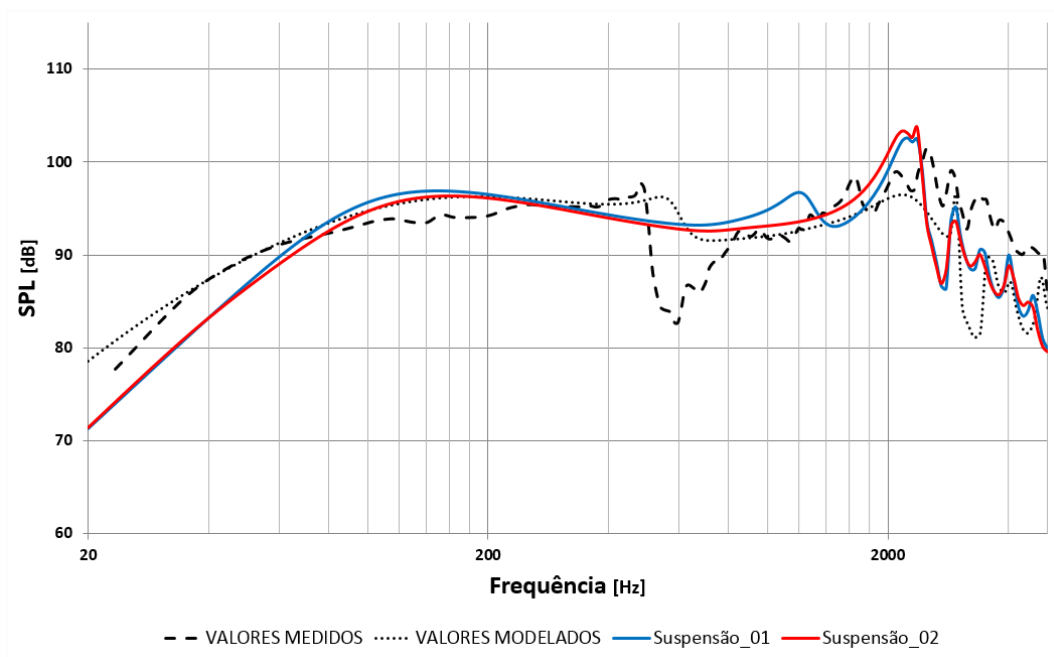


Figura 4.49 – Curva de resposta com diferentes suspensões no *speaker\_D*.  
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2014)

Neste exemplo, o objetivo com a alteração da suspensão era de atenuar o grande vale existente na região de 500 Hz. Ambas as geometrias propostas 1 e 2 atendem ao requisito inicial. A decisão agora de qual das duas geometrias adotar ppode ser através de critérios estéticos,

critérios de custos de ferramental para fabricação ou por utilização do componente em outros produtos visando comunicar este item.

#### 4.5.2 Redução de tempo de projeto

Os cinco modelos de transdutores utilizados na pesquisa, conforme apresentado na Tabela 4.8, estavam no cronograma de desenvolvimento da engenharia de produto. A proposta de trabalho com modelagem computacional ocorreu de forma paralela ao desenvolvimento tradicional, a fim de garantir que o método proposto não fosse interferir ou por ventura, atrasar os cronogramas de lançamento de cada produto.

Como visto na Figura 4.35, o tempo médio de projeto de um novo produto é de 12 meses, e também que o maior tempo aplicado especificamente em desenvolvimento está nas etapas iniciais 2 e 4, “Desenvolvimento e projeto dos componentes” e “Elaboração de protótipos”, respectivamente.

Com o uso da modelagem computacional, verificou-se que em ambas as amostras a redução de tempo nestas etapas foi de aproximadamente 55%, uma vez que os objetivos e as premissas impostas no *input* do projeto foram atingidas nas primeiras interações do modelo. Este ganho ou avanço no cronograma permite que o engenheiro, apesar de ter atingido as especificações, foque suas ações em outros produtos ou venha a corrigir e melhorar seu produto em desenvolvimento, como foi visto na Figura 4.49. Esta “melhoria” no protótipo em desenvolvimento pode ser lançada como um novo produto no futuro, sendo que as especificações iniciais deste item em projeto foram atendidas. Para a empresa, além de contar com um lançamento de um novo produto no futuro, mantendo o exemplo anterior, pode-se alterar a geometria da suspensão, como visto na Figura 4.47 e ter algo novo para ser inserido no mercado.

Percebeu-se, também, a diferença de tempo entre uma interação virtual e uma interação entre protótipos reais em bancada. Como exemplo, uma operação básica de montagem de cone, considerando apenas a operação de montar este componente, de um alto-falante em um protótipo, leva em média 15 minutos de operação e aproximadamente seis horas para cura de adesivos de fixação dos componentes do sistema móvel. Deve ser acrescido a este tempo, também, o trabalho gasto para verificar resultados entregues por este protótipo em laboratório, o que usualmente consome mais cinco horas, dependendo da agenda e demanda do laboratório de testes. Logo, uma simples interação entre cones pode consumir ao engenheiro de produto, dois dias de trabalho. Lembrando, também, que neste exemplo, não foram considerados os custos de

cada operação e nem os custos com os demais componentes do alto-falante. Entre uma interação e outra no alto-falante montado, consegue-se reaproveitar apenas o conjunto magnético em um novo protótipo para o mesmo produto. Nos protótipos virtuais, uma interação de mudança de cone no *software* CAE utilizado, não consome mais de dez minutos e os resultados são instantâneos.

Entretanto, há uma inércia bastante grande antes de utilizar a modelagem computacional que consome basicamente tempo. Além de adquirir o *software* CAE, capacitar os engenheiros ao uso dessa ferramenta é necessária a criação de um banco de dados com as propriedades de cada material que possa vir a ser utilizado. Esta biblioteca de materiais é constantemente atualizada visando contemplar todas as matérias-primas. Neste estudo, a caracterização dos materiais utilizados nestas amostras da Tabela 4.8, demandaram aproximadamente dois meses de esforço. Os materiais uma vez caracterizados podem ser inseridos no banco de dados e suas propriedades podem atender a qualquer outro modelo que pretenda utilizar esta matéria-prima.

## 5 CONCLUSÃO

Em trabalhos passados (Duarte [15]) se havia investigado o potencial do uso de modelagens computacionais para: resolução de problemas, facilitar processos e auxiliar engenheiros de desenvolvimento de produto dentro de indústrias. Os resultados promissores encontrados nesse trabalho demonstraram que o uso de modelagem computacional também é uma boa opção de ferramenta para a indústria de alto-falantes. No entanto, a utilização de simulação computacional traz consigo outras demandas para o setor de desenvolvimento como, por exemplo, o próprio fato da necessidade de caracterização dos materiais para obtenção das propriedades mecânicas. Em contrapartida, surgem novas oportunidades através da utilização dessa ferramenta, como é o caso da aplicação para controle de qualidade de componentes e processos dentro da linha fabril. Dessas oportunidades e desafios surge, em parte, a motivação e o foco desse trabalho, sendo que é possível prever o comportamento do protótipo final do alto-falante antes mesmo deste ser montado, reduzindo custos e o tempo de desenvolvimento.

Este estudo investigou como a inserção de uma nova ferramenta em um ambiente onde o processo de desenvolvimento era através de interação de protótipos pode se comportar e fornecer resultados que podem reformular toda a filosofia, até então, de criar produtos. A pesquisa se iniciou com uma revisão bibliográfica sobre o processo de desenvolvimento de novos produtos (DNP), uso de modelagem computacional dentro da indústria, uma abordagem do comportamento do alto-falante, principais componentes e suas respectivas atribuições no funcionamento do transdutor e, por fim, verificou-se as opções para *softwares* de simulações gerais e algumas opções de programas específicos para trabalho com transdutores. Nesta análise de *software* também foi considerado, além das entregas de cada ferramenta, o custo para compra, treinamento e operação do respectivo programa. A partir dessa revisão verificou-se quais transdutores estavam no cronograma de desenvolvimento da empresa onde a pesquisa foi aplicada, assim, o uso da ferramenta de modelagem correu em paralelo com o método tradicional de desenvolvimento. Essa atitude foi tomada para garantir que as ações da pesquisa não viessem a interferir e obstruir o cumprimento dos cronogramas de entrega de novos produtos.

Após este estudo realizado, cinco amostras foram consideradas para a pesquisa. O primeiro passo foi verificar os dados de entrada indicados pela equipe de portfólio e engenharia de produto. Tais especificações contemplam: determinação de potência, sensibilidade, resposta em frequência, impedância e custo. Este último parâmetro é, de certa forma, o mais importante



para a indústria. Não é viável produzir e investir tempo em um produto onde o custo final não seja atraente ou não competitivo com outras opções do mercado.

Seguindo com as amostras consideradas, a etapa seguinte foi a escolha do *software* a ser utilizado, considerando basicamente as suas entregas. Com a definição do programa de computador CAE, foi necessário verificar quais as informações que esse programa solicitava para conseguir entregar os resultados. Houve então dois momentos, a modelagem do conjunto magnético e a modelagem do sistema móvel. Esta segunda, muito mais complexa e com peculiaridades únicas. Na modelagem do sistema móvel, verificou-se que as propriedades mecânicas são de extrema importância para atender basicamente aos parâmetros de sensibilidade e resposta em frequência. As informações a serem inseridas para cada material são: Módulo de Young, Coeficiente de Poisson, densidade e amortecimento.

Experimentos também foram conduzidos, tanto para caracterizar as propriedades dos materiais, como para comprovar a validade dos modelos e da ferramenta escolhida. Os protótipos finais, montados pela engenharia de produto, também foram medidos e comparados com os valores encontrados na simulação. Observou-se que a utilização de simulações computacionais permitiu prever as curvas de resposta e a sensibilidade muito antes de se confeccionar os protótipos. Uma vez implementada uma biblioteca de materiais consistente e confiável, a simulação ganha força e se torna muito atraente.

Foi realizado um paralelo dos resultados obtidos na pesquisa com os dados existentes na fundamentação teórica acerca de simulações numéricas. Conforme Chung [6] algumas de suas vantagens descritas provindas da utilização de simulações computacionais foram confirmadas nessa pesquisa. É o caso do curto período de tempo de experimentação e, principalmente, da facilidade da análise dos dados e resultados. A facilidade de experimentação pode ser justificada com a praticidade de propor novas geometrias ou materiais para o modelo. Como exemplo, pode-se apresentar as alterações propostas para geometria da suspensão, Figura 4.48. A segunda vantagem verificada nesse estudo, diz respeito à facilidade da análise e o imediato acesso aos resultados para cada alteração proposta, em poucos minutos, como visto na Figura 4.49.

Entretanto, Robinson [38] registrou nos referenciais teóricos algumas desvantagens para a utilização de simulação computacional como ferramenta de desenvolvimento. Dessas apresentadas no capítulo inicial deste estudo, algumas não condizem com o verificado nessa pesquisa, sendo elas: custo elevado para aquisição de *softwares* CAE e consumo de tempo elevado. No primeiro item apontado como desvantagem, com uma pesquisa refinada das ferramentas de mo-

delagem computacional existentes no mercado, encontrou-se os *softwares* desenvolvidos pela Loudsoft. Esses programas, além de uso específico para alto-falantes, possuem o menor custo para aquisição, o que foi apresentado na Figura 4.34. A ferramenta utilizada para modelagem do conjunto magnético (*software* FEMM) não tem custo de aquisição, é um programa com versão gratuita e os resultados entregues se aproximam dos valores reais, o que pode ser verificado na Tabela 4.9. A segunda desvantagem apresentada que não correspondeu com a pesquisa foram referentes ao tempo gasto para criação do modelo e execução da simulação. Para aplicação em alto-falantes estas desvantagens não foram confirmadas.

A partir dos resultados encontrados neste trabalho, pode-se dizer que a modelagem computacional apresenta um grande potencial de aplicação no que se refere ao desenvolvimento de alto-falantes. Houve redução do tempo de desenvolvimento nas etapas 2 e 4 da Figura 4.35 de aproximadamente 55%, o que atende ao objetivo geral desse estudo. Essa redução de tempo permite ao engenheiro de produto gerenciar outros projetos ou buscar melhorias para o modelo em estudo. Foram apresentados dados modelados que, confrontados com valores medidos, apresentaram resultados satisfatórios e, o mais atraente para a indústria, que o *software* escolhido é específico para transdutores e possui o menor custo agregado em comparação com outros programas CAE.

As informações e conhecimentos adquiridos nesta pesquisa formaram uma base de dados para futuros trabalhos em alto-falantes mais complexos ou para outras aplicações, como, por exemplo: na reprodução de altas frequências em *tweeter* e *driver*.

Como sugestão para trabalhos futuros, destacam-se:

- a) Realização de maior número de experimentos com maior número de materiais para aumentar a confiabilidade na nova ferramenta de modelagem computacional;
- b) Melhor entendimento onde cada propriedade mecânica do cada tipo de material influi na curva de respostas, como exemplo, a elasticidade da aranha, na maioria dos casos, está associada à compliância do sistema móvel e atua com expressão na frequência de ressonância do transdutor;
- c) Encontrar novas maneiras, através de modelagem computacional, para adquirir novos resultados importantes para o alto-falante, como, por exemplo, a curva polar do transdutor e a temperatura da bobina em operação;
- d) Estudo da influência da temperatura na compressão de potência do transdutor;
- e) Uso de modelagem computacional para determinar o tempo de vida do alto-falante,

com base nas variações sofridas pelo seu uso ao longo do tempo;

f) Desenvolvimento de materiais específicos para alto-falantes (materiais para aranhas, suspensão e cones).

## REFERÊNCIAS

- [1] Mogens Myrup Andreassen and Lars Hein. *Integrated product development*. IPU, 2000.
- [2] K. Bertoldi, P. M. Reis, S. Willshaw, and T. Mullin. Negative poisson's ratio behavior induced by an elastic instability. *Advanced Materials*, [www.advmat.de](http://www.advmat.de), June 2009.
- [3] J. W. M. Bertrand and J.C. Fransoo. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, 22(2):241–264, 2002.
- [4] N. J. Bolgenhagen. O processo de desenvolvimento de produtos: proposição de um modelo de gestão e organização. Master's thesis, Universidade federal do rio grande do sul, 2003.
- [5] Constâncio Bortoni. Desenvolvimento de um método de controle em tempo real da temperatura da bobina e do deslocamento do cone de alto-falantes para operação em alta potência. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC, agosto 2005.
- [6] Christopher A. Chung. *Simulation modeling handbook: a practical approach*. Department of Industrial Engineering Houston, Texas, 2004.
- [7] Kim B. Clarck and Takahiro Fujimoto. *Product Development Performance: Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry*. Boston Massachusetts, 1991.
- [8] R. G. COOPER. Winning at new product. *Perseus Publication: Cambridge, MA*, 2001.
- [9] Charles Merle Crawford and C Anthony Di Benedetto. *New products management*. Tata McGraw-Hill Education, 2008.
- [10] Carlos Correia da Silva and Homero Sette Silva. Alto-falantes e caixas acústicas, características e utilização. *I SEMEA - Seminário de Engenharia de áudio, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM*, pages 1–21, 2002.
- [11] Marina de Andrade Marconi and Eva Maria Lakatos. *Fundamentos de Metodologia Científica*. Editora Atlas S.A., 5ª edição edition, 2003.

- [12] Deonir de Toni and Adilene Alvares Mattia. Administração do processo de desenvolvimento de novos produtos: um estudo de caso na indústria plástica. *XXIV Encontro nacional de engenharia de produção*, novembro 2004.
- [13] Norman K. Dhalla and Sonia Yuspeh. Forget the product life cycle concept. *Harvard*, 54(1):102–112, jan-feb 1976.
- [14] Vance Dickason. *Loudspeaker Design Cookbook*. Audio Amater Press, Peterborough, New Hampshire, 7 edition, January 2006.
- [15] Roberto Nunes Duarte. Simulação computacional: Análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de auto-peças. Master's thesis, Universidade Federal de Itajubá, novembro 2003.
- [16] G. Erdogan and F. Bayraktar. Measurement of dynamic properties of materials. *Congress Inter Noise*, august 2003.
- [17] John E. Ettlle and Jorg M. Elsenbach. Modified stage-gate: Regimes in new product development. *Journal of Product Innovation Management*, 24:20–33, january 2007.
- [18] Fernanda Menezes Ferrari, RA MARTINS, and JC TOLEDO. Ferramentas do processo de desenvolvimento do produto como mecanismos potencializadores da gestão do conhecimento. In *Brazilian Congress of Product Development Management*, 3rd, 2001.
- [19] C. R. Harrel, K. B. Ghosh, and R. Bowden. Simulation using promodel. *New York: McGraw-Hill*, 1996.
- [20] DJ Henwood and GP Geaves. Finite element modelling of a loudspeaker part 1: Theory and validation. In *119th Convention of the Audio Engineering Society, New York, NY*, pages 7–10, 2005.
- [21] Leandro Toss Hoffmann. Estudo de simuladores computacionais aplicados ao ciclo de desenvolvimento de plataformas orbitais. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2009.
- [22] Schlechter Klippel. Loudspeaker cone vibration. Comercial Papaer, august 2009.

- [23] Wolfgang Klippel and Joachim Schlechter. Distributed mechanical parameters of loudspeakers, part 2: Diagnostics. *Journal of the Audio Engineering Society*, 57(9):696–708, 2009.
- [24] Philip Kotler. *Administração de marketing: análise, planejamento, implementação e controle*. Atlas, 5ª edição edition, 1998.
- [25] Jean Jackes Lambin. *Marketing estratégico*. Mc Graw Hill - Lisboa, 2000.
- [26] Q Liu. Literature review: Materials with negative poisson's ratios and potential applications to aerospace and defence. Technical report, DTIC Document, 2006.
- [27] Débora Gomes Machado and Marcos Antônio de Souza. Análise das relações entre a gestão de custos e a gestão do preço de venda: um estudo das práticas adotadas por empresas industriais conserveiras estabelecidas no rs. *Revista Universo Contábil*, 2(1):42–60, 2006.
- [28] Ana Cristina Mongelli Martin and Marly Monteiro de Carvalho. Os benefícios e as restrições do uso da simulação virtual no processo de desenvolvimento de produtos. *XXIV Encontro nacional de engenharia de produção*, 2004.
- [29] Ana Paula Freitas MUNDIM. *Desenvolvimento de produtos e educação corporativa*. São Paulo: Atlas, 2002.
- [30] Satish Nambisan. Information systems as a reference discipline for new product development. *Mis Quarterly*, 27(1), 2003.
- [31] Eduardo Borba Neves and Clayton Amaral Domingues. *Manual de Metodologia da Pesquisa Científica*. Centro de Estudos de Pessoal (CEP), 2007.
- [32] Jalal Nikoukaran, Vlatka Hlupic, and Ray J Paul. Criteria for simulation software evaluation. In *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*, pages 399–406. IEEE Computer Society Press, 1998.
- [33] Marvin L Patterson and John A Fenoglio. *Leading product innovation: accelerating growth in a product-based business*. John Wiley and Sons, 1999.
- [34] Ivan Costa Pereira. Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes. Master's thesis, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, outubro 2000.

- [35] GUIA PMBOK. *Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos*, volume 4<sup>o</sup> edição. Project Management Institute, 2008.
- [36] CK Prahalad and Gary Hamel. *Competindo pelo futuro: estratégias inovadoras para obter o controle do seu setor e criar os mercados de amanhã*. Elsevier Brasil, 2005.
- [37] Cleber Cristiano Prodanov and Ernani Cesar de Freitas. *Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico*. Editora Feevale, 2<sup>a</sup> edição edition, 2013.
- [38] E. Robinson. *Simulation: The practice of model development and use*. England: John Wiley and Sons Ltd., 2004.
- [39] THOMAS A. ROEMER, REZA AHMADI, and ROBERT H. WANG. Time-cost trade-offs in overlapped product development. *The Anderson School of Management*, 2000.
- [40] Henrique Rozenfeld. Modelo de referência para o desenvolvimento integrado de produtos. *Encontro Nacional De Engenharia De Produção*, 17, 1997.
- [41] Robert R Ryan and Ann Arbor. Digital testing in the context of digital engineering"functional virtual proto-typing". *VDI BERICHTE*, 1489:163–186, 1999.
- [42] Robert G Sargent. Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation conference*. Winter Simulation Conference, Department of Electrical Engineering and Computer Science, 2007.
- [43] Melissa A Schilling and Charles WL Hill. Managing the new product development process: strategic imperatives. *The Academy of Management Executive*, 12(3):67–81, 1998.
- [44] Andrew F Seila. Introduction to simulation. In *Proceedings of the 27th conference on Winter simulation*, pages 7–15. IEEE Computer Society, 1995.
- [45] Homero Sette Silva. Potência "rms"ou potência média? *Sociedade de Engenharia de Áudio - AES*, page 20, Junho 2004.
- [46] Homero Sette Silva. Variação da resistência da bobina móvel em função da temperatura. ETELJ papers, [www.etelj.com.br/etelj/artigos/VARIACAO-DA-RESISTENCIA.pdf](http://www.etelj.com.br/etelj/artigos/VARIACAO-DA-RESISTENCIA.pdf), June 2014.

- [47] Fernanda Steffens and Raul Fangueiro. Materiais auxéticos: o efeito do coeficiente de poisson negativo. *Revista de Design, Inovação e Gestão Estratégica*, 2012.
- [48] Sergio Takahashi and Vania Takahashi. *Gestão de Inovação de Produtos Estratégia, Processo, Organização e Conhecimento*. 1 edition, 2007.
- [49] Rosana da Rosa Portella Tondolo. A interação da estratégia competitiva e custos com o processo de desenvolvimento de produtos: um estudo multi-casos. Master's thesis, Universidade de Caxias do Sul, março 2010.
- [50] João Batista Turrioni and Carlos Henrique Pereira Mello. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção*. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 2012.
- [51] H. W. Volberda. *Organization Flexibility: Change and Preservation*. PhD thesis, University of Groningen, The Netherlands, 1992.
- [52] Carlo Zuccatti. Thermal parameters and power ratings of loudspeakers. *Journal of the Audio Engineering Society*, 38(1/2):34–39, 1990.



# APÊNDICES

---

## APÊNDICE A – Memorial de cálculo das medições das propriedades mecânicas dos materiais utilizados em formas de bobinas.

Item	Material	Nº Amostra	A	B	C	massa	densidade	rho	l	d	E	n	Q	fs	xpeak	
---	---	---	mm	mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	mm	mm	MPa	---	---	Hz	mm	
1	31	D	1	10	79,61	0,12	0,14	1465,478	1475,789	20	0,1	3352,079967	0,034339	29,121411	73,029505	0,188638
1	32	D	2	10	78,29	0,12	0,14	1490,186	1475,789	20	0,1	3804,999683	0,022738	43,980158	77,806967	0,191817
1	33	D	3	10	79,22	0,12	0,14	1472,692	1475,789	20	0,1	3900,119927	0,027081	36,925674	78,773502	0,117317
1	34	D	4	10	78,37	0,12	0,13	1382,332	1475,789	20	0,1	4029,136338	0,023478	42,59237	80,06582	0,146999
1	35	D	5	10	79,3	0,12	0,14	1471,206	1475,789	20	0,1	3944,644296	0,024426	40,940437	79,221871	0,153317
1	36	D	6	10	79,19	0,12	0,14	1473,25	1475,789	20	0,1	3707,761246	0,025969	38,507303	76,806337	0,167615
1	37	D	7	10	78,03	0,12	0,14	1495,151	1475,789	20	0,1	4062,70096	0,027788	35,986143	80,398621	0,15203
1	38	D	8	10	79,57	0,12	0,14	1466,214	1475,789	20	0,1	3885,528635	0,025627	39,020923	78,626009	0,144451
1	39	D	9	10	79,25	0,12	0,14	1472,135	1475,789	20	0,1	3743,448718	0,026094	38,322587	77,175085	0,175341
1	40	D	10	10	78,96	0,12	0,15	1583,08	1475,789	20	0,1	3833,237331	0,024784	40,349215	78,095144	0,158895
								1475,789			3800,160429	0,026758	37,85058	77,729737		
2	41	E	1	10	78,73	0,12	0,12	1270,164	1272,816	20	0,1	2432,295185	0,034462	29,017575	66,985165	0,159269
2	42	E	2	10	76,9	0,12	0,12	1300,39	1272,816	20	0,1	2221,619822	0,029104	34,3598	64,018481	0,157491
2	43	E	3	10	78,78	0,12	0,12	1269,358	1272,816	20	0,1	2290,610332	0,032506	30,763346	65,004901	0,160608
2	44	E	4	10	79,31	0,12	0,12	1260,875	1272,816	20	0,1	2221,195364	0,028842	34,671588	64,012365	0,174428
2	45	E	5	10	78,83	0,12	0,12	1268,553	1272,816	20	0,1	2314,975374	0,029287	34,14483	65,349713	0,15517
2	46	E	6	10	79,02	0,12	0,12	1265,502	1272,816	20	0,1	2545,820283	0,026853	37,239252	68,530573	0,19002
2	47	E	7	10	79,04	0,12	0,12	1265,182	1272,816	20	0,1	2662,119283	0,025608	39,050974	70,078412	0,196834
2	48	E	8	10	77,87	0,12	0,12	1284,192	1272,816	20	0,1	2178,637774	0,03177	31,476258	63,396168	0,179964
2	49	E	9	10	75,69	0,12	0,13	1431,277	1272,816	20	0,1	2162,584109	0,028712	34,828647	63,162164	0,164523
2	50	E	10	10	78,67	0,12	0,12	1271,133	1272,816	20	0,1	2123,624499	0,033458	29,887919	62,590635	0,151366
								1272,817			2332,321991	0,03021	33,401282	65,551824		
3	21	C	1	10	79,92	0,07	0,08	1430,001	1447,399	15	0,1	4139,166158	0,022705	44,042327	84,978658	0,150337
3	22	C	2	10	79,28	0,07	0,08	1441,545	1447,399	15	0,1	3596,52906	0,043422	23,029904	79,212775	0,193569
3	23	C	3	10	78,02	0,07	0,08	1464,826	1447,399	15	0,1	3783,537257	0,043256	23,11795	81,246086	0,144725
3	24	C	4	10	78,68	0,07	0,08	1452,538	1447,399	15	0,1	4348,701234	0,034514	28,973767	87,103023	0,193103
3	25	C	5	10	76,65	0,07	0,08	1491,007	1447,399	15	0,1	3925,326714	0,042023	23,796348	82,754448	0,133408
3	26	C	6	10	79,62	0,07	0,08	1435,39	1447,399	15	0,1	3736,525101	0,038661	25,866062	80,739749	0,14948
3	27	C	7	10	79,84	0,07	0,08	1431,434	1447,399	15	0,1	3739,227558	0,038734	25,81681	80,768941	0,16224
3	28	C	8	10	80,02	0,07	0,09	1606,741	1447,399	15	0,1	4400,906172	0,027585	36,25121	87,624287	0,170119
3	29	C	9	10	79,14	0,07	0,08	1444,095	1447,399	15	0,1	4110,341192	0,031793	31,453714	84,682248	0,20612
3	30	C	10	10	79,6	0,07	0,08	1435,75	1447,399	15	0,1	4028,679296	0,025074	39,882201	83,836818	0,162176
								1447,398			3934,225952	0,035576	29,553231	82,813638		
4	11	B	1	10	80,02	0,12	0,16	1666,25	1673,552	30	0,12	5620,762145	0,033402	29,938005	39,468333	0,18184
4	12	B	2	10	80,23	0,12	0,17	1765,757	1673,552	30	0,12	7637,885748	0,019851	50,375871	46,008467	0,186502
4	13	B	3	10	79,99	0,12	0,16	1666,875	1673,552	20	0,12	5858,003851	0,022192	45,060404	90,6585	0,190471
4	14	B	4	10	79,07	0,12	0,16	1686,27	1673,552	20	0,12	5238,201081	0,024989	40,017436	85,728413	0,141994
4	15	B	5	10	79,99	0,12	0,16	1666,875	1673,552	20	0,12	6389,815567	0,032251	31,006521	94,684276	0,186733
4	16	B	6	10	79,1	0,12	0,16	1685,63	1673,552	20	0,12	4768,849159	0,028968	34,520612	81,797587	0,169305
4	17	B	7	10	79,79	0,12	0,16	1671,053	1673,552	20	0,12	5183,185667	0,02518	39,714691	85,277034	0,159222
4	18	B	8	10	79,77	0,12	0,16	1671,472	1673,552	20	0,12	5082,972929	0,022272	44,899239	84,448628	0,172007
4	19	B	9	10	79,65	0,12	0,16	1673,99	1673,552	20	0,12	5707,079111	0,024648	40,571606	89,483023	0,170188
4	20	B	10	10	79,25	0,12	0,15	1577,287	1673,552	20	0,12	5707,325012	0,032676	30,603653	89,484951	0,138725
								1673,552			5481,108689	0,026738	38,216064	81,443224		
5	1	A	1	10	76,45	0,2	0,23	1504,251	1519,96	40	0,2	6235,937092	0,015454	64,709192	40,895625	0,195262
5	2	A	2	10	79,08	0,2	0,25	1580,678	1519,96	40	0,2	5731,138935	0,01662	60,169508	39,205451	0,531374
5	3	A	3	10	78,82	0,2	0,24	1522,456	1519,96	40	0,2	6229,157435	0,013866	72,119638	40,873388	0,191875
5	4	A	4	10	79,85	0,2	0,23	1440,2	1519,96	40	0,2	6448,984398	0,014239	70,23026	41,588346	0,194512
5	5	A	5	10	80,15	0,2	0,24	1497,193	1519,96	40	0,2	6535,427149	0,014118	70,832371	41,866145	0,193921
5	6	A	6	10	79,24	0,2	0,24	1514,387	1519,96	40	0,2	6345,95344	0,014369	69,596627	41,254794	0,217439
5	7	A	7	10	79,96	0,2	0,25	1563,282	1519,96	40	0,2	5000,938208	0,01689	59,20598	36,622816	0,199964
5	8	A	8	10	79,06	0,2	0,23	1454,591	1519,96	40	0,2	6107,554683	0,014495	68,988453	40,472466	0,255861
5	9	A	9	10	79,04	0,2	0,24	1518,219	1519,96	40	0,2	6554,474603	0,013957	71,646249	41,92711	0,251526
5	10	A	10	10	78,54	0,2	0,25	1591,546	1519,96	40	0,2	6138,217077	0,015245	65,593661	40,573933	0,259623
								1519,96			6150,314655	0,0147757	68,0183428	40,573313		

# ANEXOS

---

## ANEXO A – Material Parameter Measurement - MPM

**C4**

Material Parameter Measurement Set (MPM)

### Material Parameter Measurement (MPM)

**C4**

Software Module and Accessory of the KLIPPEL R&D SYSTEM

<p><b>FEATURES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Measure E modulus and damping</li> <li>• Evaluate raw materials</li> <li>• Specify loudspeaker parts more precisely</li> <li>• Provide input data for FEA</li> <li>• Find optimal materials</li> <li>• Maintain consistent products</li> </ul>	
--	--

The material parameter measurement module (MPM) measures the Young's E modulus and the loss factor  $\eta$  of the raw material used for loudspeaker design. The vibration beam technique (ASTM E 756-93) is modified to be capable for measuring also soft materials such as thin foils of plastic, rubber and any kind of paper and impregnated fabric. After cutting 1cm strips the probes are clamped on one side and excited pneumatically by using the suspension part measurement bench.

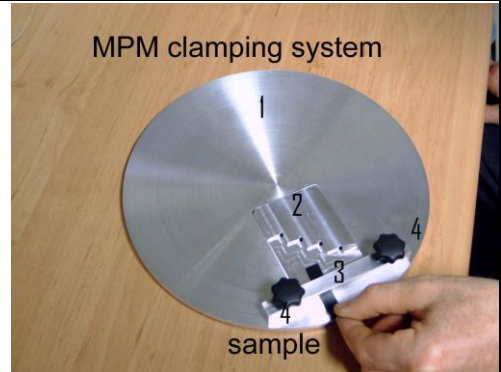
Article Number: 2500-200, 2500-210

**CONTENTS:**

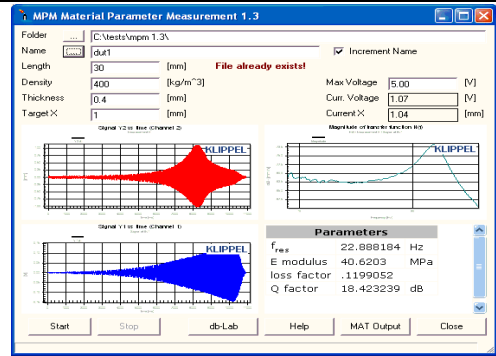
Components of MPM Set .....	3
additional Components required .....	3
Objects of the Measurement .....	4
Measurement Procedure .....	4
Measurement Principle .....	5
Results .....	6
Limits .....	6

## Components of MPM Set

**MPM Clamping set** A special clamping set is provided to clamp the samples with a defined beam length. The Clamping Set comprises a round platform (1) with a rectangular opening, an upper clamping beam (3) fastened by two screws (4) at the platform and an adjustment tool (2). The adjustment tool (2) has got 5 slots of different length. After inserting the adjustment tool into the platform (see right picture) the sample will be inserted into the slot and clamped by fastening the two screws. After removing the adjustment tool and placing the platform in the SPM measurement box the sample is excited pneumatically to the first bending mode.



**Material Parameter Software (MPM automation)** A visual basic application is provided which allows to perform the measurements with a minimum user interface dedicated to this special measurement. The user provides the input parameter (length, density, thickness) and determines where the measurement results should be saved

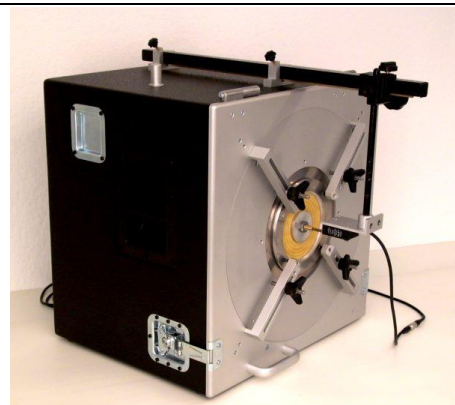




## Additional Components required

**SPM Measurement Box** The MPM measurement can be realized cost effectively as an add-on of the suspension part measurement SPM. After removing the clamping part used for spiders and surrounds the remaining measurement box holds the MPM clamping platform. An adjustable laser guide holds the displacement laser sensor and a hole in the box is provided to measure the sound pressure inside the box. The clamping platform can easily put up in a horizontal position for charging but is used in a vertical position during measurement. The set consists of the cable for connecting the measurement bench to Klippel Distortion Analyzer.

**Or**

**LST Bench**

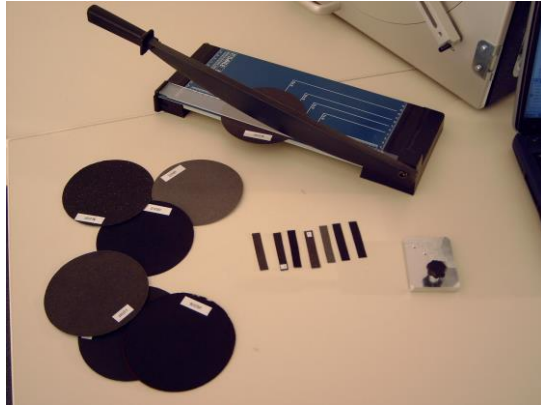


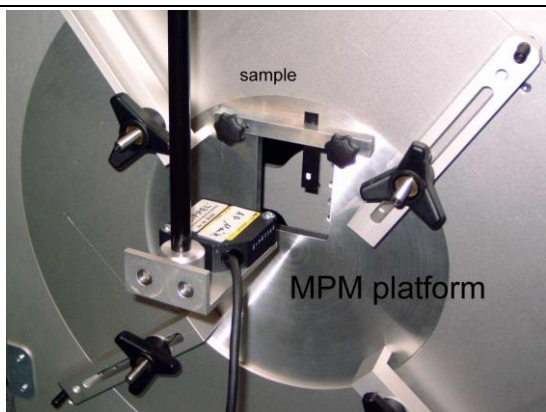
Measurement Platform	The Distortion Analyzer 1 or 2 is used as the hardware to control the laser head and to perform the measurement.	
Sensor	<p>A displacement laser sensor is required to measure the displacement of the material samples at the required precision.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• For MPM standalone operation the Keyence IL-030 is recommend.</li> <li>• The Keyence LK-H52 sensor that is usually used with the KLIPPEL R&amp;D System could be used as well.</li> <li>• The older Keyence LK-G32 sensor also, but with displacement limitations.</li> <li>• The ANR 1282 sensor is not recommend cause of its higher noise level.</li> </ul>	
additional Software	<p>The MPM uses the following software modules of the KLIPPEL R&amp;D System</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfer Function Module (TRF)</li> <li>• dB-Lab</li> </ul>	
Amplifier	A power amplifier is required for performing the measurement. The amplifier should provide more than 50 W output power on 4 Ohm.	
Microphone	A quarter inch microphone (e.g. light mic) is required.	
Computer	A personal computer (not available at KLIPPEL) is required for performing the measurement.	

## Objects of the Measurement

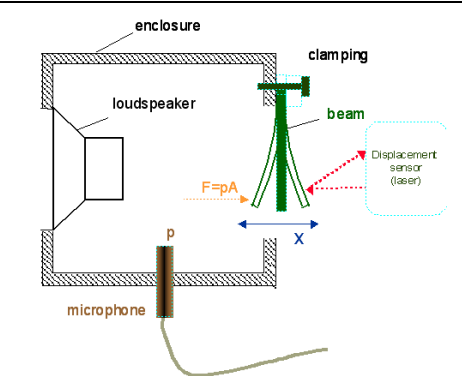
Material	<p>This measurement technique may be applied to almost any material used in loudspeakers such as paper, rubber, plastic, fabric, metals and any compound materials. It is recommended to use samples cut from a plain sheet, plate or foil. Samples taken from spherical cones or surround roles are problematic because the curvature in the beam makes the beam stiffer causing higher values of the measured E modulus. Paper, plastics, metals or impregnated fabric which has been bended before should not be used at all.</p> <p>Many materials such as fabric are not isotropic that means the measured material properties depend on the direction of the cut.</p> <p>To verify the measured parameter values it is recommended to repeat the measurement with a different batch of the material, cut the samples in different direction and clamp the sample at a different beam length.</p>
----------	--

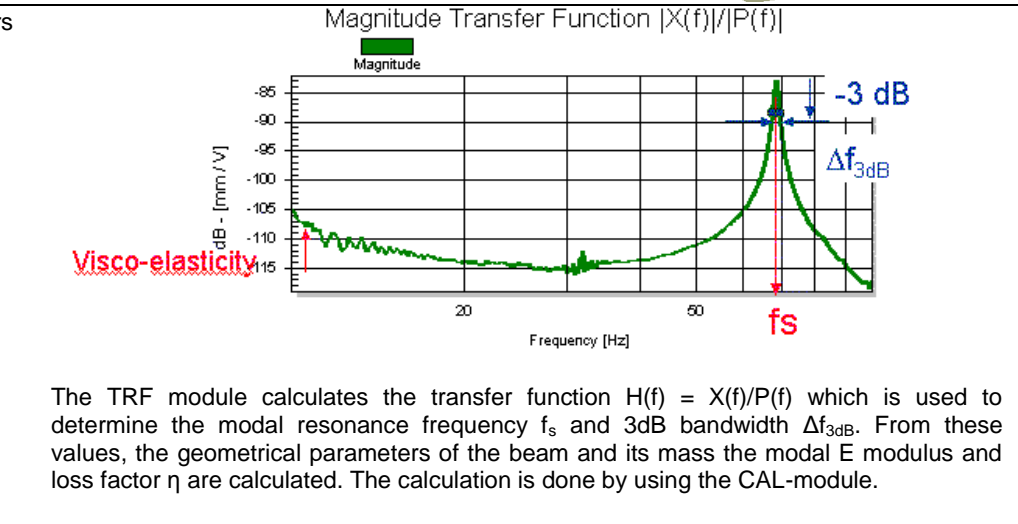
## Measurement Procedure

Cutting the samples	<p>The samples should be cut in small stripes 1 cm wide and 8 cm long by using a knife or a pair of scissors. It is important to have a constant width along the beam which can be ensured by using a plate shear.</p>	
Measuring Density and thickness	Measure with a high-precision scale the weight of the sample and determine the thickness of the sample. Calculate the density.	

<p>Clamping</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Insert the adjustment tool</li> <li>2. Insert the sample into the slot giving the desired length of the beam</li> <li>3. Fix the upper clamping beam</li> <li>4. Remove the adjustment tool</li> <li>5. Adjust the laser displacement sensor to the free end of the beam</li> </ol>	
<p>Start the Measurement</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Start the visual basic application MPM Start.exe</li> <li>2. Enter the geometrical data, density and the name of the sample</li> <li>3. Press the start button</li> </ol>	

## Measurement Principle

<p>Physics</p>	<p>The beam is excited pneumatically by a sine sweep generated by the TRF module. During the sweep the sound pressure <math>P(f)</math> and excursion <math>X(f)</math> are measured simultaneously. <math>X(f)</math> is achieved from a displacement sensor (laser), which is directly mounted on the test box to minimize vibration, offset and other errors. The sound pressure is measured with a microphone which is mounted in the measurement bench. Both sensors are powered by the Distortion Analyzer hardware (DA 2).</p>	
----------------	---	---

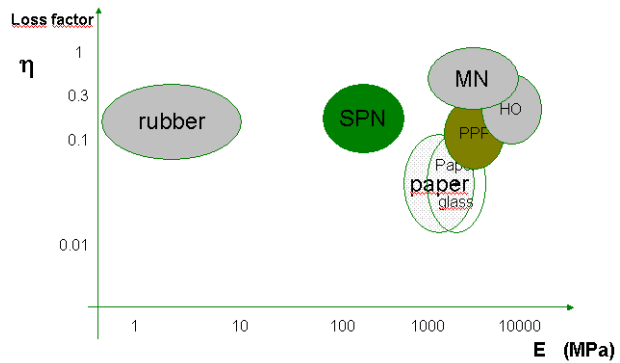
<p>Material Parameters</p>	<p>Magnitude Transfer Function <math> X(f)/P(f) </math></p>  <p>The TRF module calculates the transfer function <math>H(f) = X(f)/P(f)</math> which is used to determine the modal resonance frequency <math>f_s</math> and 3dB bandwidth <math>\Delta f_{3dB}</math>. From these values, the geometrical parameters of the beam and its mass the modal E modulus and loss factor <math>\eta</math> are calculated. The calculation is done by using the CAL-module.</p>
----------------------------	--

## Results

E Modulus  
loss factor

This measurement provides the E modulus and the loss factor dynamically measured. It is recommended to present those measurement data together with the excitation frequency (identical with the resonance frequency of the first bending mode) and information about the ambient temperature and humidity.

### Common Loudspeaker Materials



Summary of measurement data

summary total.txt										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
	DUT	rho	d	l	E	n	Q	fs	xpeak	
		kg/m³	mm	mm	MPa		dB	Hz	mm	
4	38#B sample	611	50	0.5	3409.97665	0.035128	29.086914	76.35498	0.229049	
5	38#B sample	568	50	0.5	2737.34687	0.036335	28.793513	70.953369	0.203297	
6	026# sample	591	50	0.5	2789.69229	0.032399	29.789446	70.220947	0.222055	
7	026# sample	595	50	0.5	2593.16431	0.031502	30.033329	67.474365	0.218153	
8	007# sample	623	50	0.5	2948.41478	0.032337	29.805969	70.3125	0.225167	
9	007# sample	624	50	0.5	3140.60304	0.035298	29.044985	72.509766	0.230506	
10	007#a sample	577	50	0.5	2542.08649	0.027661	31.16251	67.840576	0.236282	
11	007#a sample	561	50	0.5	2130.67805	0.031422	30.055455	62.986281	0.223894	
12	007#b sample	584	50	0.5	3235.88432	0.031789	29.954459	76.080322	0.22671	
13	007#b sample	589	50	0.5	3390.47237	0.039875	27.98604	77.545166	0.215726	

The most important results are usually stored in a txt file called summary.txt located in the folder where all the results of one measurement series are collected. This file can be viewed by a simple txt editor or exported to any table oriented post processing software (e.g. EXCEL®).

Data base

All of the primarily data (sound pressure, displacement) and the calculated transfer response are stored in a database which can be viewed by dB-Lab. A detailed analysis may be useful to setup the system, check the SNR of the signals and to cope with a malfunction of the system.

## Limits

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Young's E modulus	$f_s$	0			MPa
Loss factor	$\eta$	0.0001	0.1	1	
Q factor (related to Loss factor)	Q	80	20	0	dB
Resonance frequency	f	20		100	Hz
Density	$\rho$	0	100		kg/m <sup>3</sup>
Thickness	D	0.05	0.5		mm
Minimal Voltage of the stimulus	$U_{min}$	0.0001	0.01		V
Maximal Voltage of the stimulus	$U_{min}$	0.0001	2	50	V
Target Displacement	$X_{target}$	0.01	0.2	2	mm
Length of the beam	L	15		50	mm

Find explanations for symbols at <http://www.klippel.de/know-how/literature.html>



## ANEXO B – Cone vibration and radiation diagnostics

### Cone Vibration and Radiation Diagnostics

**AN 31**

Application Note to the KLIPPEL R&D SYSTEM

The laser scanning vibrometer provides the precise cone geometry and the cone vibration up to 25 kHz. This data shows the modes of the vibration and their contribution to the radiated sound pressure output in the 3D space.

This data is the basis for cone vibration and radiation analysis to reveal the physical causes for peaks and dips in the frequency response and to detect rocking modes and other irregularities which cause voice coil rubbing.

The application note is a step by step instruction for performing diagnostics. A flat speaker intended for woofer application is used as a practical example.

**CONTENTS:**

Terms and Definitions.....	1
Requirements .....	3
Sound Pressure Output .....	3
Vibration Analysis .....	5
Radiation Analysis .....	8
More Information .....	10

### Terms and Definitions

**Cone Scanning**



The Scanning Vibrometer (SCN) performs a non-contact measurement of the mechanical vibration and the geometry data of cones, diaphragms, panels and enclosures. One rotational and two linear actuators ( $\phi$ ,  $r$ ,  $z$ ) move a laser displacement sensor over a user-defined grid. At each measurement point the transducer is excited by a stimulus giving sufficient spectral resolution and high SNR in the measured response over the whole audio band (< 25 kHz). The scanner system comprises the Transfer Function module TRF, DA2, control box and a triangulation laser G32. The collected geometry data can be exported to other FEA/BEA applications while the vibration data can be analyzed within the SCN Analysis software.

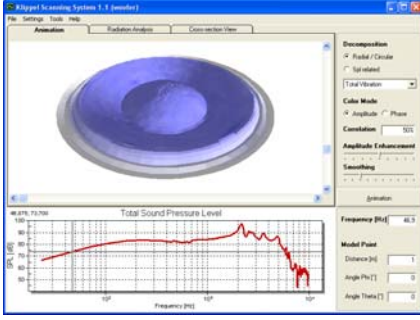
updated April 4, 2012



Klippel GmbH  
Mendelssohnallee 30  
01309 Dresden, Germany

www.klippel.de  
info@klippel.de

TEL: +49-351-251 35 35  
FAX: +49-351-251 34 31

<p><b>Analysis Software</b></p>		<p>Modern techniques of image processing are used for enhancing relevant information, suppressing noise and animating the vibration as a stroboscopic video. The sound pressure output in the far field and the directivity pattern are calculated and the contribution of each vibrating point on the vibrating surface is visualized. The software indicates critical vibration pattern and uses decomposition techniques for separating radial and circular modes.</p>
<p><b>Sound pressure level</b></p>	$SPL(r_o) = 20 \log \left( \frac{ p(\omega) }{p_o} \right) \text{ with}$ $p(\omega) = \frac{\omega^2 \rho_0}{2\pi} \int_s \frac{x_n(r_i)}{ r_o - r_i } e^{-jk r_o - r_i } dS_i$	<p>Using the Rayleigh integral the sound pressure at the point <math>r_o</math> in the sound field is calculated by integrating the acceleration of each point <math>r_i</math> weighted by the area <math>dS_i</math> of each surface element and the distance between point <math>r_i</math> and the point <math>r</math>.</p> <p>Note the Rayleigh integral is a useful approximation for relatively flat geometries operated in an infinite baffle.</p>
<p><b>Acceleration Level</b></p>	$L_a = 20 \log \left( \frac{\omega^2 \rho_0}{p_o 2\pi} \int_s \frac{ x_n(r_i) }{ r_o - r_i } dS_i \right)$	<p>The acceleration <math>X_n(r_i)</math> of each surface element <math>dS_i</math> is weighted and summarized to a acceleration level <math>L_a</math> by neglecting the phase information. Thus the acceleration level <math>L_a</math> is identical with the sound pressure level SPL as long as all elements move in-phase (e.g. piston mode).</p>
<p><b>Decomposition in radial and circular modes</b></p>	$x_n(r, \varphi) = x_{cir}(r, \varphi) + \overline{x_{rad}(r)}$	<p>If the loudspeaker cone has a round shape and the excursion <math>x_n(r, \varphi)</math> is measured in polar coordinates <math>r, \varphi</math> the total excursion can be split into a radial component <math>\overline{x_{rad}(r, \varphi)}</math> and a circular component <math>x_{cir}(r, \varphi)</math></p>
<p><b>Radial Component</b></p>	$\overline{x_{rad}(r)} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\varphi=0}^{2\pi} x_n(r, \varphi)$	<p>The radial component can be calculated by averaging versus the angle <math>\varphi</math>. The radial component is useful for comparing the results of axial-symmetrical FEA with real measurements.</p>
<p><b>Circular Component</b></p>	$x_{cir}(r, \varphi) = x(r, \varphi) - \overline{x_{rad}(r)}$	<p>The circular component is the difference between total vibration and the radial component. The circular component reveals rocking modes and other circumferential modes.</p>
<p><b>Sound Pressure related Decomposition</b></p>	$x_n(r, \varphi) = x_{in}(r, \varphi) + x_{anti}(r, \varphi) + x_{quad}(r, \varphi)$	<p>The total vibration can be split in three components with different contribution to the sound pressure output (constructive, destructive, without effect).</p>
<p><b>In-Phase Component</b></p>	$x_{in}(r, \varphi) = \text{Re}_+ \{ x_n(r, \varphi) \exp(j \arg(p(\omega)) + jk(r_o - r_i)) \}$	<p>The in-phase component contributes actively to the sound pressure output</p>
<p><b>Anti-Phase Component</b></p>	$x_{anti}(r, \varphi) = \text{Re}_- \{ x_n(r, \varphi) \exp(j \arg(p(\omega)) + jk(r_o - r_i)) \}$	<p>The anti-phase component reduces the sound pressure output</p>

<b>Quadrature Component</b>	$x_{quad}(r, \varphi) = \text{Im}\{x_a(r, \varphi) \exp(j \arg(p(\omega)) + jk(r_o - r_i))\}$	The quadrature component does not contribute to the sound pressure at point $r_o$ . The total volume velocity of this component is zero.
<b>Loss factor</b>	$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$	The loss factor is defined by the 3dB decay of the acceleration level $L_a(f_1) = L_a(f_0) - 3\text{dB}$ below resonance ( $f_1 < f_0$ ) and $L_a(f_2) = L_a(f_0) - 3\text{dB}$ above resonance ( $f_2 > f_0$ ) at the natural frequency $f_0$ .

## Requirements

### Start Up

To perform Cone diagnostics the following equipment is required:

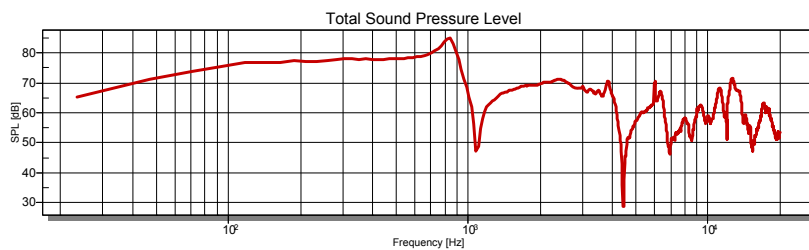
- Install the SCN Analysis Software on your computer
- Click on Scanning data in a file \*.ksp to start the analysis

## Sound Pressure Output

### SPL response in axis

**Motivation:** We start with the on-axis response which is the most relevant characteristic of the driver and simple to measure and to predict.

**How to do it:** Select the result page *Radiation Analysis* and set the **Modeling Mode** on *SPL* and select the *Total Vibration*. The *Model point* should be at 1m distance and set all angles (*Phi* and *Theta*) to zero.



**Result:** The woofer under test has a flat response above the fundamental resonance (about 80 Hz) up to the 700 Hz. The significant peak at 800 Hz and the dip at 1100 Hz are not acceptable for the particular application.

### SPL 30 degree out of axis

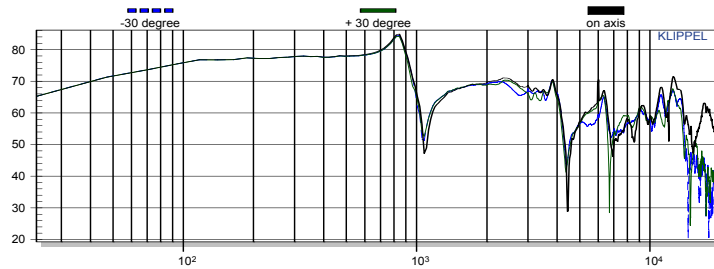
**Motivation:** Considering the size of the normal listening area it is very useful to see the variation of the SPL response for some angles out of axis.

**How to do it:** Press the button *Export Curves* to store the predicted on axis curve in the database (do not open the database yet).

Set the angle Theta = 30 degree of the Model Point. Store again the result of the current simulation in the same database.

Set the angle Theta= -30 degree and store the third simulation in the database. Now open the database with dB-Lab.

You find three operation CAL Scanner Results 1, 2 and 3. The window Input Variables shows the details of each simulation. The Total SPL curves can be copied and pasted into a common window. The window below shows the overlay of the three curves:

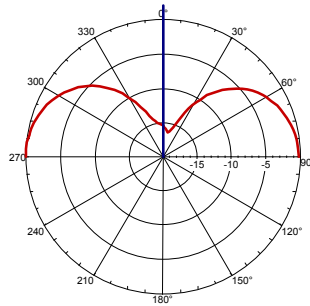


**Results:** The critical peak and dips appear also out of axis. Significant differences occur at higher frequencies.

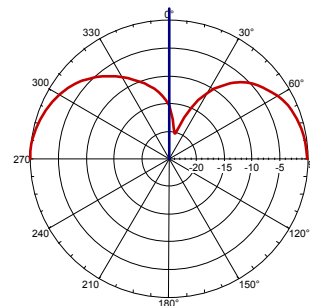
### Directivity plot

**Motivation:** For critical frequencies (where the peaks and dips occur) it is useful to investigate the variation of the SPL response over a larger variation of the angle. This is important for the radiated sound power which determines the diffuse sound in enclosed spaces (rooms).

**How to do it:** Select the result page **Radiation Analysis** to view the directivity plot. Select a frequency of interest (here at 1 kHz where the dip occurs) by entering the number or by setting the cursor in the SPL plot directly into the dip. Keep the distance  $r = 1\text{m}$  but set angle Phi to  $0^\circ$  to view the directivity in the horizontal plan. You may export the directivity plot by moving the cursor on the plot, click the right mouse button and use the popup menu entry *Export Dialog*. Change angle Phi to  $90^\circ$  to see the directivity in the vertical plan.



Directivity at the first dip frequency in the horizontal plan



Directivity at the first dip frequency in the vertical plan

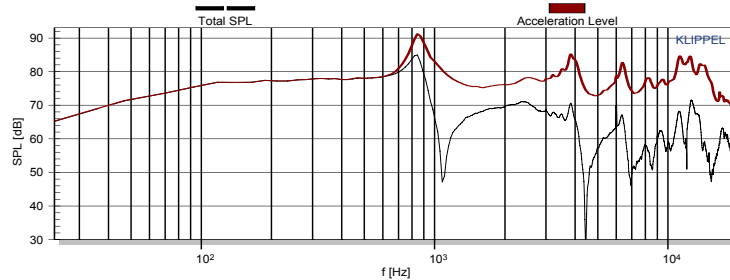
**Results:** The critical dip at 1 kHz becomes less dominant for a larger angle outside the axis. This indicates that the dip is an acoustical cancellation effect. The total sound power is much less affected by the cancellation than the on-axis SPL response.

# Vibration Analysis

## Sufficient Vibration?

**Motivation:** Without cone vibration there is no radiated sound! We recommend to start the vibration analysis by calculating the total acceleration level which summarizes the mechanical vibration and shows the maximal possible SPL if no acoustical cancellation would occur.

**How to do it:** Select the checkbox *Acceleration* under **Modeling Mode** and the acceleration level will be displayed. We recommend to export all curves to dB-Lab by pressing the button *Export Curves* and to compare the Acceleration level with the total on axis SPL level. After selecting the two curves you will see window like this:



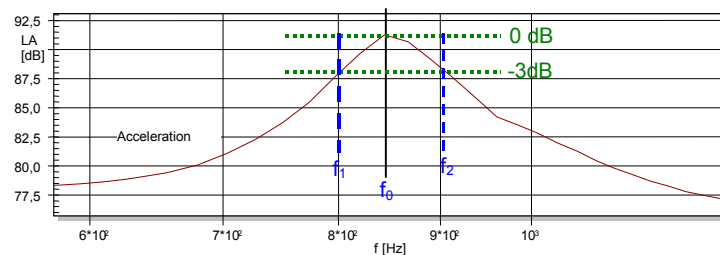
**Results:** The acceleration level is identical with the on-axis SPL response at lower frequencies where the cone vibrates as a rigid body. At higher frequencies we see the peaks in the acceleration level which occur at the natural frequencies of the mechanical modes.

The woofer in the current example produces a significant peak in the acceleration level at 850 Hz which causes the first peak in the SPL response. The other peaks at 4 kHz and above generate no excessive peaks in the SPL. It is interesting to see that there are no sharp dips in the acceleration level. Above 15 kHz the acceleration level decreases because the mass of the moving voice coil becomes dominant and is the final limit of the working range.

## Sufficient Damping?

**Motivation:** The height and sharpness of the peaks in the acceleration level show the loss factor  $\eta$  in the material. We recommend to read this number to compare different materials and treatments.

**How to do it:** Select the checkbox *Acceleration* under **Modeling Mode** zoom into the first peak of interest. Use the cursor to read dB value  $L_a(f_0)$  and natural frequency  $f_0$  of the resonance peak and search for the 3dB decay point  $L_a(f_1) = L_a(f_0) - 3\text{dB}$  below resonance ( $f_1 < f_0$ ) and the other 3dB point above resonance  $L_a(f_2) = L_a(f_0) - 3\text{dB}$  above resonance ( $f_2 > f_0$ ) and calculate the modal loss factor  $\eta$  using the definition presented above.

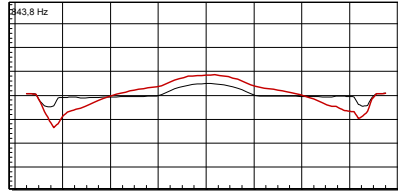


**Results:** The loss factor  $\eta$  is about 0.1 for the first natural mode occurring 850 Hz. To suppress the peak in the SPL response the loss factor has to be increased by factor 2 or more.

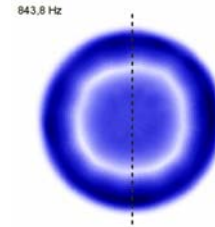
### How to increase the loss factor?

**Motivation:** More information is required to find the critical part (cone, surround, glue) where a replacement of the material or a treatment may be useful. This information lies in the shape of the vibration mode at the natural frequency  $f_0$ . The vibration mode should be overlaid with the actual geometry to simplify the localization of the problem.

**How to do it:** Set the cursor to the natural frequency  $f_0$  where the high peak occurs in the *Acceleration* level. Select the result page *Cross-section View* and set the **Amplitude Enhancement** to zero or to a value which is appropriate for visualization. It is also recommended to view the amplitude plot on result page **Radiation Analysis**.



Cross section view of geometry (black) and displaced geometry (red)



Amplitude plotted as color intensity

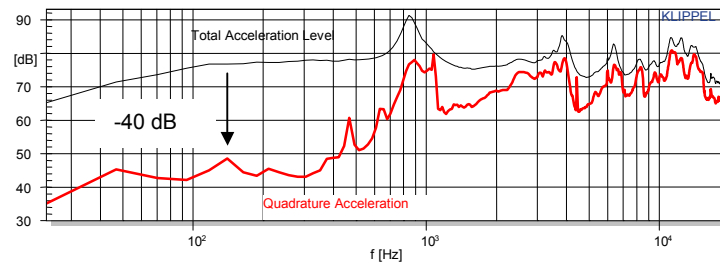
**Results:** The cross sectional view (left) reveals a first bending mode. We have positive and negative excursion at the same time. The intensity plot (right) shows the largest amplitude at the surround. There is a single node at  $r=40$  mm where is no displacement.

There are three alternatives to increase the damping: It is possible to increase the damping of the cone material (polypropylene). Coating the cone on the outer rim with a viscous material is also possible. Coating at the node has not much effect on the total damping and also applying the coating only at the centre  $r < 40$  mm is also less efficient than at the rim because the area is much smaller. The most effective solution is to use a surround material with a higher loss factor derived from the acceleration curve (see above).

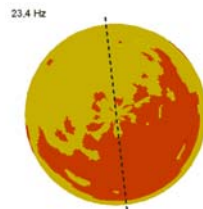
## Rocking Modes?

**Motivation:** The first circumferential mode may be interpreted as a rocking movement of the cone. This may cause a rubbing of the voice coil in the gap and produce audible distortion and a permanent damage of the speaker. Any variation of the cone and surround geometry versus the angle (e.g. varying thickness) may cause an asymmetry in the mass distribution which initializes and supports circumferential modes. The weight and flexibility of the wires and the position of the connection point on the cone are also critical. Note the rocking modes may have significant amplitude in the acceleration level but can not be detected in the radiated sound pressure output. The best indicator for circumferential modes is the quadrature component of the acceleration level.

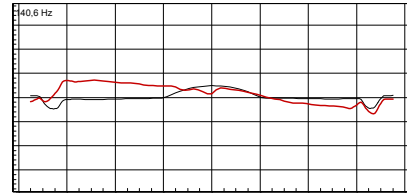
**How to do it:** Select the checkbox *Acceleration* under **Modeling Mode**, activate the check box *SPL related* under **Decomposition** and select the *Quadrature Component* in the checkbox below. Open the result page *Radiation Analysis* and look for the Quadrature component in the acceleration level which appears as a red thick curve in the window below. Search for peaks in the Quadrature component occurring at lower frequencies. In the current example woofer there is only a minor peak at 150 Hz.



To view the rocking mode activate *Phase* under *Color Mode* and set the cutting line for the cross sectional view rectangular to the border of positive and negative phase (red and yellow areas) as shown below. Select the result page *cross sectional view*.



Phase plot of the rocking mode at 150 Hz and cutting line (dashed line) for the sectional view



Cross-sectional view showing the excursion of the rocking mode (red curve) compared with the geometry of the cone (black curve).

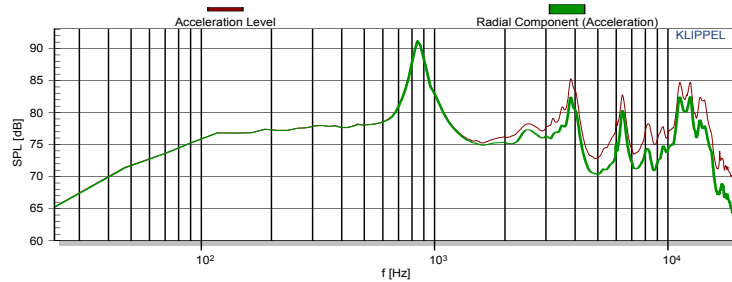
**Result:** The rocking mode at 150 Hz is 40 dB below the total vibration which shows that this particular woofer is not very sensitive for voice coil rubbing.

### Comparison with FEA

**Motivation:** At a certain point it is required to perform a finite element analysis of the cone vibration. The cone geometry measured by the Scanner at high precision may be used as an input as well as the loss factor  $\eta(f)$  determined at the natural frequencies  $f$  from the acceleration response (see above). The thickness of the cone has to be measured separately and has a high impact on the natural frequencies of the bending modes. The Young's E modulus highly depends on frequency and temperature and precise data is usually not available.

It is a common practice to find good input parameters by fitting the predicted curve to the measured curve. Since most of the FEA tools are based on an axial-symmetrical model the circular modes in the measured vibration have to be suppressed. For cones with a round shape the radial vibration component is the best response for comparing predicted and measured vibration.

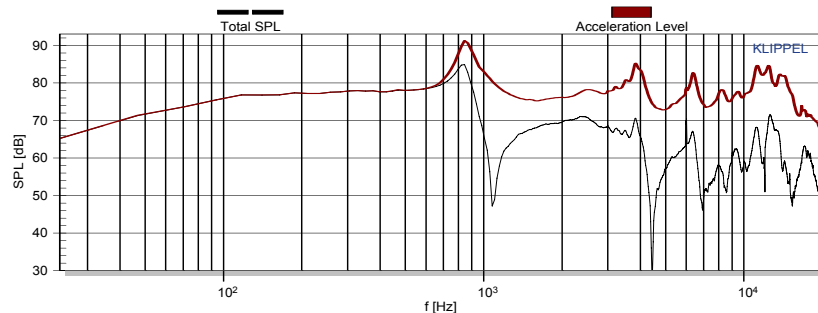
**How to do it:** Activate the checkbox Acceleration under Modeling Mode and select the checkbox *Radial* under **Decomposition** method and in the combo box *Radial component*.



## Radiation Analysis

### Acoustical Cancellation?

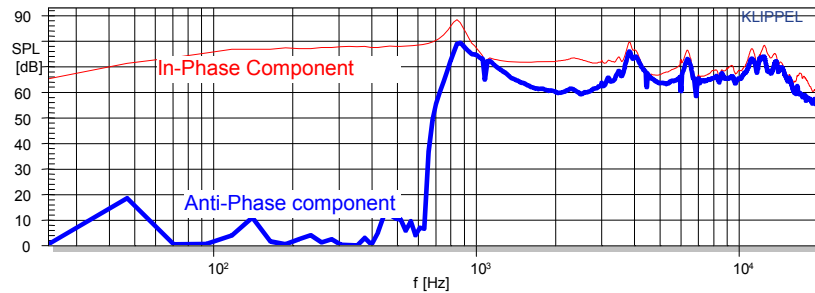
**Motivation:** Above the cone break-up frequency different cone segments move with a phase difference larger  $\pm 90$  degree. Thus some cone segments produce a volume velocity with different sign which reduces the total acoustical output. Significant differences between the acceleration and SPL response give already some clues for a radiation problem. The sharp dips in the SPL response as shown at 1.1 kHz, 4.4 kHz and 7 kHz are also indicators for acoustical cancellation.



A better criterion is the comparison of the in-phase and anti-phase component which gives also some suggestion for constructional improvements.



**How to do it:** Press the button *Export Curves* at the lower right corner of the SCN Scanning software and open dB-Lab to compare the in-Phase and Anti-Phase component in the SCN Result Curves - SPL Decomposition.



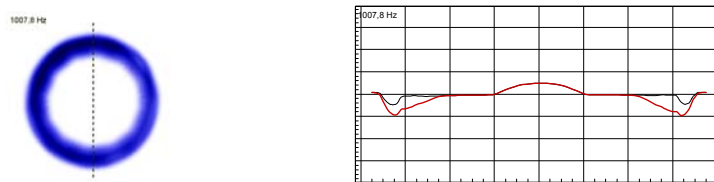
**Results:** The response of the In-Phase component (thin red curve) is very similar to the response of the acceleration level. Below break-up the In-phase component is actually identical but above cone break-up this curve is only a few dB lower. The reason is that the Anti-phase component (thick blue curve) is almost zero when the cone moves as a rigid body and increases rapidly at the cone break up (about 700 Hz). While the In-phase component actively contributes to the radiated sound the anti-component reduces the output. Acoustical cancellation occurs when the in-phase and anti-phase components become equal in level. This occurs at the same frequencies at 1.1 kHz, 4.4 kHz and 7 kHz where the SPL response shows the dips.

**Conclusion:** Loudspeaker which have a dominant in-phase component which is at least 6 dB higher than the anti-phase component will not suffer from acoustical cancellation.

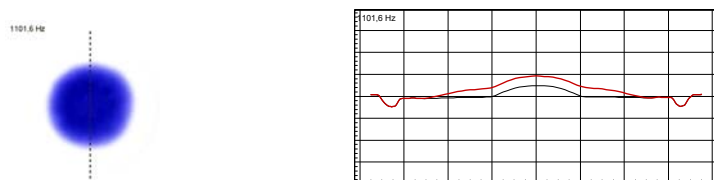
### Where is the sound generated?

**Motivation:** To avoid or fix acoustical cancellation problems we have to support the vibration mode which is in phase with the radiated output. The first step is to understand where the in-phase component is generated.

**How to do it:** Activate the checkbox *SPL* under **Modeling Mode** and select the *In-Phase Component* under **Decomposition SPL related**. Select a frequency just below the cancellation frequency (here 1000 Hz) and view the intensity plot on the result page Radiation Analysis. Select a second frequency (1100 Hz) which is just above the cancellation frequency and compare the two plots.

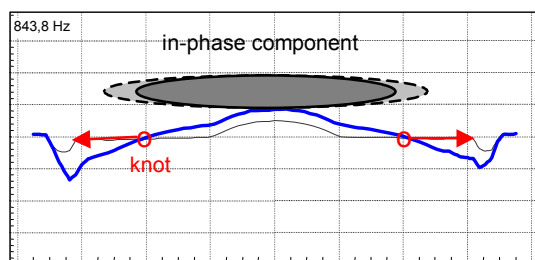


Intensity plot and cross-sectional view of the in-phase component at 1000 Hz



Intensity plot and cross-sectional view of the in-phase component at 1100 Hz

**Result:** The in-phase component below the critical cancellation frequency is found at the outer part of the cone and above the cancellation frequency it is found in the center of the cone. The in-phase component switches its position also at 4.4 kHz, 7 kHz, 8.5 kHz, 10 kHz and 15 kHz.



A dominant in-phase component avoids acoustical cancellation effects. Keep the area of the in-phase component as large as possible !

**Remedy:** At low frequencies where the cone moves as a rigid body (piston) the In-phase component also covers the inner part of the cone. Thus we have to keep the In-phase component at higher frequencies in the inner part of the cone. Conventional paper cones with an apex angle with less than 70 degree break up gradually from the outside rim. The first bending node occurs close to the outer rim of the paper cone and the In-phase component always stays in the center of the cone but decreases in size with rising frequency when more and more nodes occur. Flat cones with a high apex angle (> 70 degree) need some tricks to change the shape of the first natural modes. Using a material with a different Young's E modulus will usually not solve this problem because the cancellation point will only be shifted in frequency. Increasing the damping of the cone is also not effective. We recommend to vary the thickness of the cone material to generate more bending stiffness in the center. This can also be obtained by using additional ribs below a flat cone. Increasing the mass of the surround or varying the mass distribution on the cone is also an effective way to get the first nodes close to the outer rim of the cone.

## More Information

### Papers

- W. Klippel, J. Schlechter, "Measurement and Visualization of Loudspeaker Cone Vibration," presented at the 121<sup>st</sup> Convention of the Audio Eng. Society, 2006, October 5-8
- F.J.M. Frankort, "Vibration Patterns and Radiation Behavior of Loudspeaker Cones," J. of Audio Eng. Soc., Sept. 1978, Vol. 26, pp. 609- 622.
- C. Struck, "Analysis of the Nonrigid Behavior of a Loudspeaker Diaphragm using Modal Analysis," presented at 86<sup>th</sup> convention of Audio Eng. Soc., Hamburg, 1989, preprint 2779.
- D. A. Barlow, et. al., "The Resonances of Loudspeaker Diaphragms," presented at the 65<sup>th</sup> Convention of the Audio Eng. Soc., February 1980, preprint 1590.

updated April 4, 2012

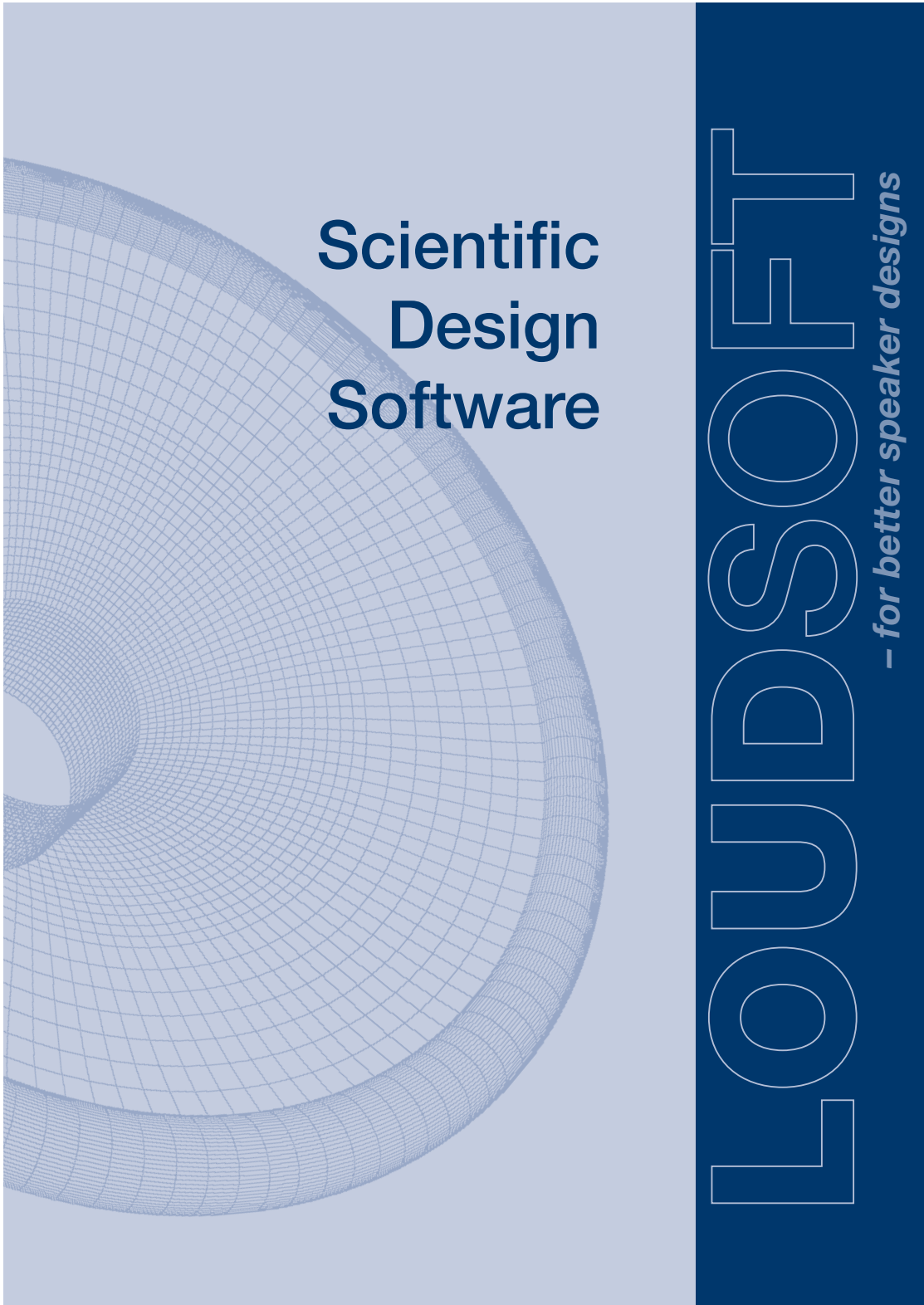


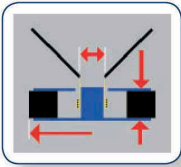
Klippel GmbH  
Mendelssohnallee 30  
01309 Dresden, Germany

www.klippel.de  
info@klippel.de

TEL: +49-351-251 35 35  
FAX: +49-351-251 34 31

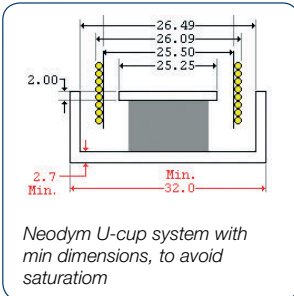
**ANEXO C – *Scientific design Software* - LOUDSOFT**





# FINEMotor™

## Magnet System & Voice Coil Design Program



The FINEMotor program is the unique simulation tool for prediction of SPL & T/S parameters including Xmax and wire diameter. FINEMotor is also the unique simulation tool for designing the magnet system, voice coil and spider for woofers, domes, telephone-receivers, headphones etc.

### Precise and Fast

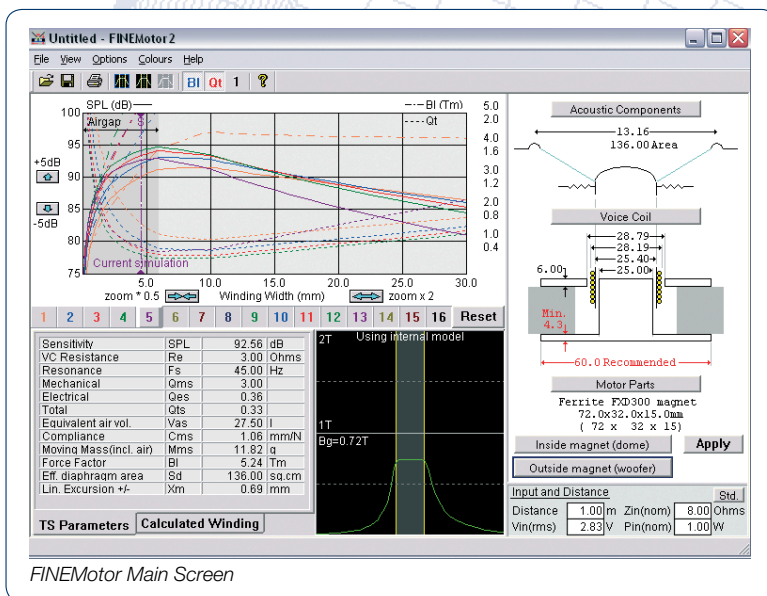
When SEAS was designing a new product line and used FINEMotor for the first time, the result was right on target and saved them a lot of time. After this first attempt SEAS now works with FINEMotor for all new motor systems.

### Material database

With the latest version of FINEMotor you can add your own magnets and wires to the database, which already has a lot of standard Chinese materials to choose from.

### Special Features:

- Accurate prediction of SPL, T/S parameters and winding data
- Round and edge wound copper, aluminium and CCAW wires.
- Fs is calculated from Cone Fo and spider deflection/ Resonance/ flexibility.
- Ferrite, neodymium and user specified magnetic material
- Automatic magnetic compensation of air gap for larger wires or multi-layer VC's



- Twin voice coil 2+2 layers in parallel
- Shielded/unshielded – only one button click
- Saturation shown in top plate, pole and back plate
- Qms is estimated by including VC former losses for Alu or Kapton
- Selection between steel or non-steel frame
- Updated internal flux models: T-Pole, extended Pole
- Up/down offset of Voice coil now standard

# FINEMotor™ Examples

## New designs:

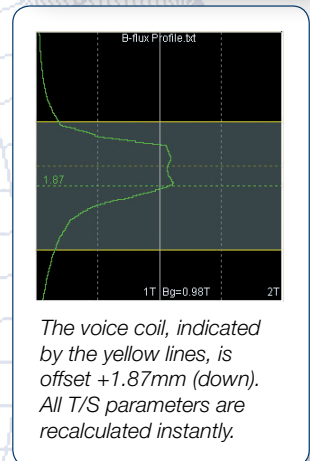
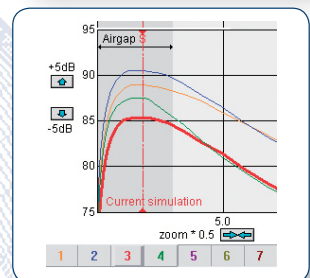
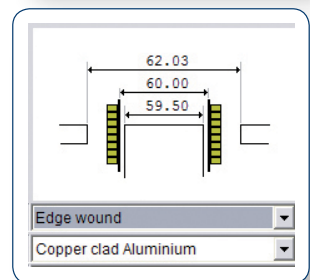
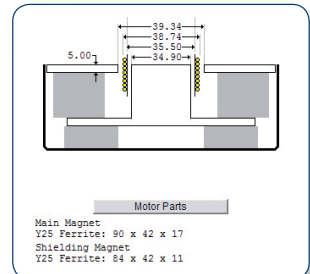
- You can design an 8 inch long throw subwoofer with shielding and for instance a  $Q_{ts}=0.33$ , plus calculate the spider deflection + stiffness to get  $F_s=28\text{Hz}$ . The program gives you all winding data for the 3.35 ohm Voice Coil.
- Design a given size motor and get maximum BL, even when using a steel frame.
- With FINEMotor you can check the symmetry of the woofer magnet gap flux and move the Voice Coil up/down to find the best position. Calculate BL(x) at for example 2 and 5mm above and below the air gap.
- Design an optimum one layer Copper Clad Aluminum Voice Coil for a compression driver

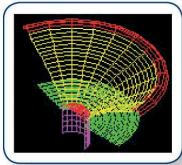
## Modifications of existing designs:

- You want to try a long 4 layer Voice Coil, but don't know how to predict the BL and  $Q_{ts}$  because the air gap is changed? Just input the 4 layers and the clearance you want between Voice Coil and top plate. FINEMotor will give you a choice of solutions with increasing  $X_{max}$ . Just pick the one you want and all winding data + motor dimensions are calculated for you.
- Add shielding cup + rear magnet to a woofer without changing the TS parameters.
- Optimize the sensitivity of a neodymium dome tweeter by using the best neodymium disk size.

## Problem solving:

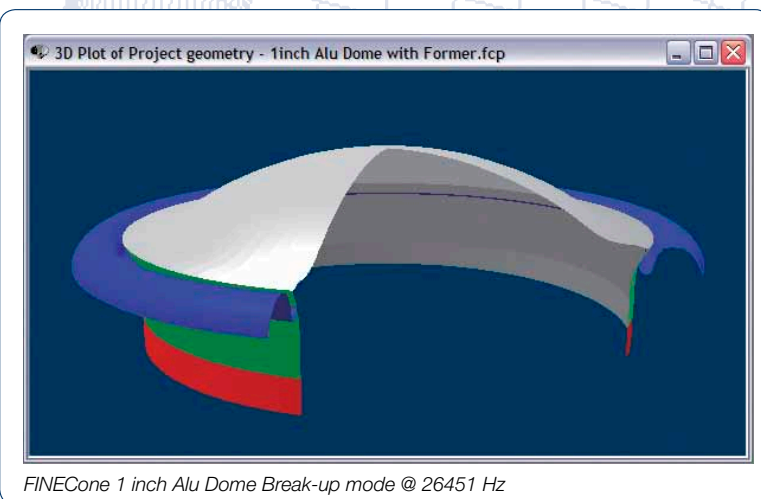
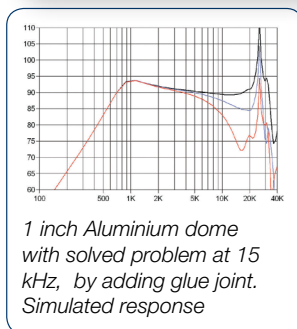
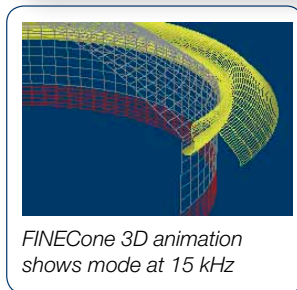
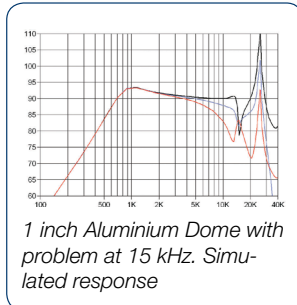
- Our current woofer is very good, but has too low impedance for our amplifier. Here you can modify the Voice Coil and motor, and still keep the TS parameters.





# FINECone™

## Acoustic Finite Element Dome/Cone Simulation Program



The FINECone program gives you freedom to use your time and creativity to design better loudspeakers. Within seconds you can calculate the Frequency Response for a new driver or analyse your problems with an existing driver. FINECone can drastically reduce time-to-market for new products.

### Save Engineering Time

High accuracy calculations in FINECone only take 5-30 seconds.

### Save Tooling & Costs

FINECone predicts the performance so well that you only need to build one prototype instead of trial-and-error experiments.

### Better Products

Use the Material Database to find the best driver components and optimize the cone thickness or stiffness that fits your exact demands.

### Problem free production

Optimising the development process streamlines the production so you don't have to spend your time firefighting.

### New Features

- DXF error tracking
- Export of response curves with phase
- Automatic air load calculation
- Frequency response over plot
- Library of DXF and FINECone models
- Import of TS parameters from FINEMotor
- Undo in 10 levels
- Improved whizzer cone calculation
- Chinese interface

# FINECone™ Examples

## New Designs:

In the design process for a completely new woofer the cone and surround is a big challenge, because the response is not known and no dimensions exists.

With FINECone this situation is elegantly handled and the user can quickly simulate many different cone shapes, and play with thicknesses etc. plus surround roll dimensions as well as dust caps, glue joints and even voice coil former materials.

The design of dome tweeters is even more demanding, but not with FINECone. Here you can simulate the thinnest dome diaphragm up above 50 kHz and optimize the dome and surround shape, as well as a very thin glue joint.

## Modification of existing designs:

If you are not satisfied with a standard product you can simulate it in FINECone and find out what can be improved. It is very easy for example to change the cone material to Kevlar, Titanium or even more exotic materials like Beryllium.

## Problem Solving

Maybe you have designed a nice looking woofer with an inverted dust cap, but unfortunately with bad response already around 1300 Hz. By exporting the response to FINE X-over we find that the x-over cannot remedy this problem. However the FINECone simulation shows that the surround is the problem. The simulated solution is found easily and corrects the problem fully.

Another example is a Chinese made Silk Dome Tweeter which has a response problem at 7 kHz. The simulation revealed that the dome edge and surround was breaking-up at this frequency.

A possible solution was an additional glue joint to stiffen the edge. However that adds mass giving a lower SPL. A better solution was found by changing the bad geometry to avoid the problem without loss of efficiency.

