

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**MELHORIA DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO  
DE ANÉIS DE CENTRAGEM DE ALTO-FALANTES**

**JOÃO LUIS BOMBARDA**

**PORTO ALEGRE**

**2004**

**JOÃO LUIS BOMBARDA**

**MELHORIA DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO  
DE ANÉIS DE CENTRAGEM DE ALTO-FALANTES**

Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia – modalidade  
Profissionalizante – Ênfase Qualidade e Desenvolvimento de Produtos e Processos na  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Mestrado Profissionalizante em Engenharia

Orientador: Professora Dra. Carla Schwengber ten Caten

Porto Alegre

2004

**Este Trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

---

**Prof<sup>a</sup>. Carla Schwengber ten Caten**  
Orientadora  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Prof<sup>a</sup>. Helena Beatriz Bettella Cybis**  
Coordenadora  
Mestrado Profissionalizante em Engenharia  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Flávio Sanson Fogliatto**  
PPGEP/UFRGS

**Prof<sup>a</sup>. Giovana Savitri Pasa**  
PPGEP/UFRGS

**Prof<sup>a</sup>. Marília Amaral da Silveira**  
Engenharia Elétrica/ UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

*Aos meus pais, Dorvalino e Isolda, pelo esforço e dedicação em promover minha educação.*

*A minha família, Edilene e Pedro, pela compreensão das horas dedicadas aos estudos.*

*Aos meus colegas de trabalho, que dispensaram apoio, troca de informações e a ajuda necessária. Em especial ao Rafael Hehn, André Cruz, Tadeslau Souza, Homero Sette e Santiago Papadopoulos.*

*A minha orientadora, Carla ten Caten, pelo apoio nas revisões e aos ensinamentos.*

*Ao professor Luis Franz, pela ajuda nas revisões.*

## **RESUMO**

O tema deste trabalho versa sobre a produção de anéis de centragem de alto-falantes de uma empresa de alto-falantes do Rio Grande do Sul. O objetivo geral do trabalho é melhorar o processo de fabricação de anéis de centragens de alto-falantes. Como objetivo específico, quer-se conhecer melhor, através de estudos de Desdobramento da Função Qualidade (QFD), Projeto de Experimentos e Análise de Regressão, os parâmetros de processo que afetam a qualidade dos mesmos, e apontar soluções para a melhoria do processo, reduzindo refugos e retrabalhos. Em função dos resultados, foi elaborado um plano de ação de melhorias do processo, partindo das conclusões do experimento e visando-se melhorar a situação atual do processo na empresa. Na apresentação dos resultados, testa-se o efeito das melhorias e avalia-se o trabalho no intuito de melhorar o processo na empresa em questão.

**Palavras-chave:** qualidade, compliância, alto-falante.

## **ABSTRACT**

The theme of this work turns about the production of loudspeakers spiders in a company of Rio Grande do Sul. The general objective of the work is to improve the process of production of loudspeakers spiders. As specific objective, wants to know better, through studies of Experiments Projects, Quality Function Deployment (QFD) and Regression Analysis, the process parameters that affect the quality of the products, and to point solutions for the improvement of the process, reducing refuses and reworks .In function of the results, a plan of action of improvements of the process was elaborated, leaving of the conclusions of the experiment and being sought to improve the current situation of the process in the company. In the presentation of the results, the effect of the improvements is tested and the validity of the work is evaluated in the intention of improving the process in the company in subject.

**Keywords:** quality, compliance, loudspeaker.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	10
1 COMENTÁRIOS INICIAIS .....	11
1.1 Introdução.....	11
1.2 Tema e objetivos.....	13
1.3 Justificativa.....	14
1.4 Método.....	15
1.5 Limitações do trabalho .....	17
1.6 Estrutura do trabalho .....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Projeto de experimentos .....	19
2.1.1 Roteiro para realização de projetos de experimentos .....	21
2.2 Modelo de projeto de experimentos .....	22
2.2.1 Identificação do problema .....	22
2.2.2 Planejamento e execução do experimento.....	23
2.2.3 Modelagem da variável de resposta e da sua variância .....	24
2.3 Análise de variância.....	24
2.3.1 Modelo estatístico.....	25
2.3.2 Tabela ANOVA .....	26
2.4 Análise de regressão .....	28
2.4.1 Análise da validade dos modelos .....	30
2.5 QFD- Desdobramento da função qualidade .....	31
2.5.1 Pesquisa de mercado: a voz do cliente .....	33
2.5.2 Matriz da qualidade .....	35
2.6 Definição e usos dos alto-falantes .....	37
2.6.1 Partes do alto-falante .....	43
2.6.2 Circuito magnético .....	44
2.6.3 O cone.....	46
2.6.4 Conjunto suspensão e centragem.....	49
2.7 Caracterização dos alto-falantes.....	52
2.7.1 Compliância.....	57
2.7.2 Sistema de medição de compliância.....	59
3 PLANEJAMENTO DO ESTUDO .....	61
3.1 Análise da situação atual .....	62

3.2	Definição das características da qualidade .....	62
3.3	Planejamento do projeto de experimentos .....	63
3.4	Execução do projeto de experimentos .....	64
3.5	Modelagem do processo .....	64
3.6	Análise dos resultados .....	64
3.7	Confirmação das melhorias .....	65
4	ESTUDO DE CASO .....	66
4.1	Análise da situação atual .....	67
4.2	Definição das características da qualidade .....	68
4.2.1	Ouvir a voz do cliente (o quê) .....	69
4.2.2	Ouvir a voz do especialista (como) .....	70
4.2.3	Identificação dos parâmetros secundários .....	71
4.3	Planejamento do projeto de experimentos .....	73
4.4	Execução do projeto de experimentos .....	74
4.5	Modelagem do processo .....	75
4.6	Análise dos resultados .....	79
4.7	Confirmação das melhorias .....	83
5	COMENTÁRIOS FINAIS .....	86
5.1	Conclusões .....	86
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	87
	REFERÊNCIAS .....	89
	ANEXOS .....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistematização de um Projeto de Experimentos .....	21
Figura 2 – Modelo conceitual da Matriz de QFD para a escolha dos FCs.....	36
Figura 3 – Esquema do Alto-falante em corte.....	38
Figura 4 – Alto-falantes elípticos .....	42
Figura 5 – Alto-falantes coaxiais.....	43
Figura 6 - Partes do Alto-Falante .....	44
Figura 7 - Esquema em corte do conjunto magnético de um Alto-falante .....	45
Figura 8 - Deformações elásticas e inelásticas dos materiais.....	48
Figura 9 - Estudo da Variação de Concentração de Resina Vs. Compliância.....	50
Figura 10 - Efeito de fadiga nos anéis de centragem.....	51
Figura 11 - esquema de construção de um <i>baffle</i> -padrão (sonofletor) .....	54
Figura 12 - Efeito-mola da Lei de Hooke.....	57
Figura 13 - Planejamento do Estudo .....	62
Figura 14 - Relação entre demanda de qualidade ( cliente) e os parâmetros de resposta (especialista).....	63
Figura 15 - Esquema do processo de fabricação dos Anéis de Centragem de Alto-falantes ...	66
Figura 16 - Moldagem de um anel de centragem .....	67
Figura 17 – Anel de Centragem 200813 – acompanhamento de especificação do cliente (compliância) mostrando os limites de engenharia (em tracejado) e a situação dos lotes.....	68
Figura 18 - Estudo <i>QFD</i> : resultado da análise da Matriz das Características das Partes .....	70
Figura 19 - Estudo <i>QFD</i> : resultado da análise da Matriz dos Parâmetros de Processos.....	72
Figura 20 - Gráfico comparativo entre Y x Yprevisto.....	77
Figura 21 - gráfico de dispersão dos resíduos .....	77
Figura 22 - gráficos de resíduos para análise de validade dos modelos .....	78
Figura 23 - Gráfico de Fatores: compliância <i>versus</i> gramatura em função da temperatura de	

moldagem .....	81
Figura 24 - Gráfico de Fatores: compliância <i>versus</i> temperatura de moldagem em função do tempo de moldagem .....	81
Figura 25 - gráfico de fatores: compliância <i>versus</i> gramatura em função do tempo de moldagem .....	82
Figura 26 - Acompanhamento de Especificações de Cliente (gramatura) mostrando os limites de engenharia (em tracejado) e a evolução gramatura nos lotes, na escala de tempo .....	83
Figura 27 - Acompanhamento de Especificações de Clientes (compliância) mostrando os limites de engenharia (em tracejado) e os resultados dos lotes na escala de tempo .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados típicos de experimentos fatoriais com 2 fatores.....	27
Tabela 2 - Tabela <i>ANOVA</i> para projetos cruzados de três fatores.....	27
Tabela 3 – Demanda de Qualidade do Cliente .....	69
Tabela 4 – Parâmetros de Resposta do Processo.....	71
Tabela 5 - Lista dos Fatores de Ruído e como controlá-los .....	71
Tabela 6 - Lista dos Parâmetros Secundárias .....	72
Tabela 7 - Priorização dos parâmetros de resposta do processo.....	73
Tabela 8 - Matriz experimental .....	73
Tabela 9 - Representação dos parâmetros e das interações testadas o $R^2$ resultante .....	75
Tabela 10 - Análise da Regressão Linear Múltipla para a PR compliância .....	76
Tabela 11 - Estatística de Regressão .....	76
Tabela 12 - Cálculo do ajuste ótimo do processo.....	79
Tabela 13 - Dados Coletados de PR compliância.....	80
Tabela 14 - Tabela <i>ANOVA</i> do Experimento.....	80
Tabela 15 - Plano de Ação: definição das ações gerais.....	84

# 1 COMENTÁRIOS INICIAIS

## 1.1 Introdução

A Eletrônica Selenium, de Nova Santa Rita, RS, foi fundada em 1958, pelos irmãos Victor, Henrique e Arno Aggens e Gastão Schwingel. Na época estabelecida em Canoas, RS numa área de 300 metros quadrados. Em 1960 lança o seu primeiro *tweeter*, o qual torna-se sinônimo deste tipo de alto-falante por sua qualidade e desempenho técnico. Ainda nesta década foi desenvolvido o primeiro alto-falante para uso residencial. Em 1963 transfere-se para o 2º. Distrito de Canoas, Santa Rita, e em 1980 ingressa na linha de alto-falantes automotivos, atuando sempre no mercado de reposição, onde o cliente retira o alto-falante original do automóvel e instala um de melhor qualidade. A partir de 1985 passa a atender as necessidades de sonorização de grandes ambientes, entrando na linha de produtos profissionais (entre estes danceterias, cinemas, shows, eventos, trios elétricos e outros). Em 1996 foi pioneira no lançamento dos *drivers* com diafragma de titânio e, também foi projetada a nova linha *Systems* que vem a ser um *kit* completo de alto-falantes para carros, representando atualmente 15% da produção da empresa. Atualmente, a Selenium é uma das maiores indústrias de alto-falantes da América Latina, instalada num parque industrial de 40.000 metros quadrados e contando com cerca de 300 funcionários.

A empresa em questão, desde a sua fundação, atua no mercado com produtos de alta qualidade, com um bom quadro funcional composto com bons técnicos, e contando com produtos geralmente de custo superior para o cliente. A empresa é conceituada no mercado

pela excelência de seus produtos e pelo ótimo atendimento aos clientes, mas face à globalização dos mercados internacionais e ao aumento de concorrentes no mercado nacional, os clientes dispõem de uma gama muito grande de produtos concorrentes e com preços inferiores. Ocorre também a entrada de fortes concorrentes asiáticos competindo com custos baixos de mão-de-obra, então busca-se uma empresa voltada para o desenvolvimento de produtos diferenciados com alta *performance*.

Os alto-falantes são muito utilizados na vida diária. Usam-se os alto-falantes para transmitir mensagens, sejam elas discursos, músicas, alarmes. Quando deseja-se falar ou tocar um instrumento musical em público torna-se necessário amplificar o som original. Quando se quer ouvir discos ou fitas, precisa-se transformar o sinal codificado em um som. Para isto, utilizam-se amplificadores que amplificam os sinais elétricos gerados pela voz, instrumentos musicais ou discos, e de alto-falantes que transformem os sinais elétricos em som.

Não existem alto-falantes bons ou ruins, e sim alto-falantes apropriados para a aplicação escolhida. Como o alto-falante não funciona sozinho, ele é um componente, ou seja, faz parte de um sistema, eles são designados para responder bem aos graves, por exemplo, para um sistema de som que necessite de graves, e assim por diante.

Geralmente as aplicações de alto-falantes são as seguintes: *PAs (Public Adresses)* são os alto-falantes destinados a sonorizar shows e eventos. Os trios elétricos, empresas de som profissional que alugam sistemas de som para shows, etc. utilizam estes alto-falantes, que suportam grande potência e possuem alta sensibilidade (grande volume de som). Os alto-falantes para *home theatres* são de alta fidelidade, utilizados em caixas acústicas em sistemas de som residencial.

Os alto-falantes para instrumentos musicais são alto-falantes específicos para cada instrumento: guitarra, contrabaixo, voz e teclado. Para cada aplicação, tem-se um tipo de alto-falante. No caso de alto-falante para guitarra elétrica, por exemplo, ele deve responder bem na

faixa de frequências que a guitarra elétrica trabalha.

Para a linha automotiva, são os alto-falantes que podem ser vendidos no comércio ou diretamente para a indústria automotiva. Nestes produtos, têm-se alto-falantes que funcionam em condições adversas como: altas e baixas temperaturas, ruídos externos, e tudo isto deve ser pensado na hora de projetar um alto-falante.

Nas utilizações de uso geral, são os alto-falantes para TV, caixas de som para chamadas locais públicos (como aeroportos, metrô, hospitais) que geralmente têm baixo custo e uma larga faixa de frequência.

## **1.2 Tema e objetivos**

O tema deste trabalho versa sobre a produção de centragens de alto-falantes em uma empresa de alto-falantes do Rio Grande do Sul.

O objetivo geral é melhorar o processo de fabricação dos anéis de centragem, implantando um método de análise e otimização, obtendo-se produtos confiáveis, acessíveis e atendendo as necessidades dos clientes, e com rapidez, diferenciando-se frente aos concorrentes de mercado.

Este objetivo é desdobrado ainda, nos seguintes objetivos específicos:

- a) conhecer melhor, através do método Desdobramento da Função Qualidade (QFD), os fatores de processo que afetam o QTS dos alto-falantes;
- b) otimizar os parâmetros de processo através de um Projeto de Experimentos e propor eventuais melhorias;
- c) modelar o processo através de uma Análise de Regressão e propor uma otimização do processo.

Avaliam-se os alto-falantes fabricados através do parâmetro *QTS* (*Quality Total of Speaker*: fator de qualidade total do alto-falante) na inspeção final dos produtos acabados. Observa-se a ocorrência de lotes de produtos fabricados eventualmente fora da faixa de especificação de *QTS*.

Tal fator é determinado pelo amortecimento mecânico do conjunto de suspensão (avaliado pela compliância dos anéis de centragem), pela intensidade do campo magnético do ímã permanente e pela resistência elétrica das bobinas. Como o campo magnético do ímã permanente e a resistência elétrica das bobinas podem ser considerados constantes para certo alto-falante e ocorre variação na compliância dos anéis de centragem, justifica-se a necessidade de um estudo visando melhorar a compliância, ou seja, o processo de fabricação dos anéis de centragem.

Apesar de se avaliar os alto-falantes pelo fator *QTS*, e o mesmo depender de vários outros fatores (conforme demonstrado no capítulo 2), neste trabalho estudar-se-á apenas a compliância dos anéis de centragem, como sendo o fator mais importante para controlar-se o *QTS* e poder assim melhorar o processo.

### **1.3 Justificativa**

Em virtude dos anéis de centragem serem de grande importância na fabricação dos alto-falantes, e a falta de controle no processo de sua fabricação ser responsável pela perda de qualidade e produtividade, justifica-se um estudo buscando melhorias no processo. Tal motivação apresentou-se também pelo fato de o processo estar fora de controle, produzindo peças com *QTS* e compliância fora da faixa especificada, causando falhas e retrabalhos.

É neste novo ambiente de mercado competitivo, e no momento em que a alta direção está sensibilizada a definir estratégias para a empresa, que torna-se determinante o

desenvolvimento constante de novos produtos num tempo menor e com qualidade assegurada, gerando uma necessidade crescente de desenvolvimento de produtos cada vez mais eficientes, com menores custos e com mais atrativos para os clientes.

Nestes fatos é que se justifica o objetivo deste trabalho de melhorar-se o processo de fabricação dos anéis de centragem, aplicando-se técnicas que a auxiliem a produzir produtos confiáveis, acessíveis e atendendo as necessidades dos clientes, e com rapidez, diferenciando-se frente aos concorrentes de mercado.

A justificativa de escolha do parâmetro compliância para efetuar os estudos foi embasada em estudos de priorização (*QFD-Quality Function Deployment*, ou Desdobramento da Função Qualidade) levando em consideração a opinião dos clientes e dos especialistas.

#### **1.4 Método**

Esta pesquisa pode ser caracterizada, pelo ponto de vista da sua natureza, como uma Pesquisa Aplicada, orientada à geração de conhecimentos dirigidos à solução de problemas específicos. A abordagem é Quantitativa, com ênfase em análises numéricas envolvendo o uso de técnicas estatísticas (SILVA e MENEZES, 2000).

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão será feito a partir de seis etapas:

A primeira etapa é o levantamento, na bibliografia especializada no setor, sobre os conhecimentos referentes às técnicas de melhoria: Projeto de Experimentos, Análise de Regressão, Comparação entre Grupos (*ANOVA*), visando embasar o trabalho com os conceitos primordiais. São apresentados também definições básicas do produto e os parâmetros de processo. Verifica-se que através dos parâmetros dos alto-falantes, o fabricante mede as especificações técnicas dos seus produtos visando avaliar se o lote fabricado está dentro das especificações. O cliente também necessita destes parâmetros para dimensionar o

seu sistema de som, e um fator importante é o fato de associarem-se as medições à audição (avaliação subjetiva) do alto-falante.

A segunda etapa envolve o levantamento junto aos clientes das demandas de qualidade, buscando-se os parâmetros críticos importantes percebidos pelos clientes. Para tanto, utilizaram-se os dados coletados em pesquisa em um grupo de *QFD* (Desdobramento da Função Qualidade). Confeccionam-se, então, as matrizes, montando-se um grupo de estudos, obtendo-se dados de clientes, da Engenharia de Processos ou da Produção. A matriz apresentada neste trabalho é a Matriz das Características das Partes, pela sua relevância.

A terceira etapa é a definição e priorização dos parâmetros de resposta associadas a cada demanda de qualidade, com a ajuda dos especialistas. Para traduzirem-se as características de qualidade do produto exigidas pelos clientes em parâmetros de resposta mensuráveis, os especialistas transformam as demandas de qualidade exigidas pelos clientes através do auxílio de uma Matriz dos Parâmetros de Processos do estudo de *QFD* - Desdobramento da Função Qualidade.

A quarta etapa é o planejamento da coleta de dados, através da ferramenta de Projeto de Experimentos. Trata-se de uma metodologia apoiada em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise do experimento. O Projeto de Experimentos permite que se estruture a seqüência de ensaios de forma a traduzir os objetivos pré-estabelecidos pelo pesquisador, com eficiência superior em termos de informação a qualquer outra seqüência não estruturada de ensaios (RIBEIRO, 2000b).

Justifica-se o uso do Projeto de Experimentos por ele reduzir consideravelmente o trabalho experimental, otimizando custos e nos fornecendo muita informação e com resultados confiáveis.

A quinta etapa é a modelagem do processo utilizando Análise de Regressão, e também

estabelecer o ponto ótimo do processo.

A sexta etapa é a elaboração de um Plano de Ação, visando confirmar na prática a otimização dos parâmetros estudados. A partir das conclusões a respeito do trabalho realizado sugeriram-se, em reuniões com os especialistas, ações para concretizar as melhorias. Após ocorre a apresentação de resultados decorrentes das melhorias implantadas no processo da empresa, e sugestão de melhorias para trabalhos futuros, em função do aprendizado de pontos interessantes e promissores que não se inserem exatamente no escopo desta dissertação.

### **1.5 Limitações do trabalho**

Como principais limitações desta pesquisa, enumeram-se:

- a) os resultados desta pesquisa são válidos para a realidade do processo desta empresa, assim como para a realidade destas matérias-primas e qualquer substituição deve ser retestada e homologada pela engenharia;
- b) para se avaliar a satisfação do cliente, excluem-se os parâmetros de visual (design) e análise de custos, e considerou-se apenas os parâmetros de qualidade funcionais do produto;
- c) estudou-se neste trabalho a questão da compliância dos anéis de centragem, sendo este apenas um dos fatores importantes na fabricação dos alto-falantes, e os outros fatores foram considerados como sugestões para outros trabalhos.

### **1.6 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, da seguinte forma:

No primeiro capítulo faz-se uma introdução ao tema em estudo, apresentando os

objetivos, a justificativa, o método de trabalho, a estrutura e as limitações do estudo.

A Revisão Bibliográfica é dada no capítulo 2, apresentando-se os conceitos básicos para embasar o trabalho com os conhecimentos primordiais. Realiza-se uma revisão bibliográfica sobre de Projeto de Experimentos, Análise de Regressão, *QFD* (Desdobramento da Função Qualidade), e uma introdução sobre o tema do funcionamento do produto, a definição do que é o som e os mecanismos da audição, assim como os alto-falantes, uma descrição de seus principais usos e as partes que os compõem, visando contextualizar a interpretação dos capítulos subseqüentes.

No capítulo 3, por sua vez, é apresentado o Planejamento do Estudo, indicando-se a forma como o trabalho se desenvolve, introduzindo-se o modelo conceitual do trabalho.

No capítulo 4 é apresentado o Estudo de Caso, realizado na empresa, apresentando a situação atual do processo em estudo, e o experimento: seus resultados, a análise dos mesmos, e execução de um plano de ação confirmação na prática das melhorias.

No capítulo 5 apresenta-se os comentários finais e as sugestões para próximos trabalhos, que possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta revisão Bibliográfica tem como objetivos apresentar os conceitos básicos das ferramentas utilizadas na pesquisa, assim como os conhecimentos referentes ao produto e ao processo.

Este capítulo está dividido em seções e assuntos representados a seguir. Na seção 2.1, apresenta-se a introdução ao Projeto de Experimentos. Na seção 2.2, apresenta-se o tipo de Projeto de Experimentos utilizado e o modelo estatístico deste. Na seção 2.3, são feitas revisões sobre Análise de Variância ou *Analysis of Variance (ANOVA)* assim como a interpretação prática dos seus resultados. Na seção 2.4 faz-se uma revisão sobre Análise de Regressão e na seção 2.5 uma introdução ao Desdobramento da Função Qualidade ou *Quality Function Deployment (QFD)*. Na seção 2.6 dá-se uma introdução ao produto Alto-falantes e as variáveis do processo relevantes ao trabalho.

### **2.1 Projeto de experimentos**

O projeto de experimentos surgiu a partir da revisão de literatura sobre os métodos de otimização de produtos e processos, quando buscou-se um método flexível e genérico que aborda uma grande gama de problemas no ambiente industrial. Segundo Ribeiro e Caten (2000b) pode-se utilizar o projeto de experimentos para encontrar um ajuste ótimo dos parâmetros do processo, maximizando o desempenho do mesmo, minimizando custos e

buscando alternativas que produzam sistemas pouco sensíveis aos efeitos dos fatores de ruído. Para tanto, realiza-se uma seqüência de ensaios otimizados, avaliando-se estatisticamente os resultados.

Pode-se definir um experimento como um teste, ou uma série de testes, onde são feitas mudanças propositalmente nos dados de entrada, de um sistema ou de um processo, de modo que seja possível observar e identificar o efeito destas mudanças, sobre os dados de saída. O Projeto de Experimentos, por sua vez, diz respeito ao planejamento e a condução do experimento, além da análise dos dados de saída, para que conclusões válidas e objetivas possam ser obtidas deste experimento (MONTGOMERY, 1997).

A seguir são apresentados alguns conceitos básicos em planejamento de experimentos, segundo Werkema e Aguiar (1996a), Montgomery (1997) e Caten (1995):

Os **parâmetros de processo (PP)** são os parâmetros da linha de produção e/ou da composição do produto que podem ser alteradas e que talvez tenham efeito sobre os parâmetros de resposta. Os objetivos devem ser específicos e mensuráveis, não tendenciosos e de consequência prática. Para isso, uma equipe técnica deve contar com a participação de todas as pessoas necessárias ao experimento, a fim de detalhar o objetivo de tal maneira que fique claro quando este for alcançado.

Os **fatores** são os parâmetros cuja influência sobre o parâmetro de resposta está sendo estudada no experimento. Os **níveis de um fator** são os diferentes modos de presença de um fator no estudo considerado.

Os **fatores controláveis (FC)** são um subconjunto de parâmetros de processo eleitos como objetos de um estudo, eles podem ter efeito sobre os parâmetros de resposta estudadas e são propositalmente alteradas durante o experimento. Os fatores que não são de interesse do experimentador no estudo, e são mantidos constantes, são os **fatores constantes**.

Os **fatores principais** são aqueles que podem ser controlados pelos especialistas e que podem ter efeito sobre os parâmetros de resposta.

Os **fatores secundários** ou controláveis são aqueles que, embora não sejam de interesse principal, também podem exercer efeito sobre a resposta e não deveriam ou não são possíveis mantê-los constantes em todos os ensaios da matriz experimental. Os fatores secundários não podem variar conjuntamente com os principais, pois senão seus efeitos serão confundidos no experimento.

Os **fatores de ruído** são fatores não-controláveis no experimento. Não são prioritários no experimento, porém podem interferir no resultado dos parâmetros de resposta.

Os **fatores a serem mantidos constantes**, são aqueles fatores que podem ser controlados, mas que possivelmente não tenham efeito significativo sobre a resposta, ou cujo efeito já é conhecido. Mantendo-os constantes, reduz-se o custo, o tamanho e a complexidade do experimento.

As **características de qualidade** são aquelas características de produto que o cliente percebe como importantes, e a opinião dos engenheiros sobre as características de qualidade pertinentes ao produto, algumas delas não percebidas pelos clientes.

O resultado de interesse registrado após a realização de um ensaio é denominado de **parâmetro de resposta (PR)**. Ela traduz a característica de qualidade demandada pelo cliente. Elas devem quantificar objetivamente as características de qualidade, que por muitas vezes podem ter aspectos subjetivos ou vagos.

Idealmente, um parâmetro de resposta deve ser contínuo, capturar a quantidade ou qualidade de interesse para o estudo experimental, estar em unidades apropriadas e associada a um valor alvo desejável, ser obtida por ensaios não-destrutivos, não estar próxima dos limites naturais, ter variância constante sobre toda a amplitude da experimentação, ser fácil de medir e ter uma relação direta com o objetivo do experimento.

Também deve-se identificar a eventual existência de associações entre as parâmetros de resposta. Estas interações, caso houverem, são estudadas no experimento. Esses dados são úteis na escolha do modelo estatístico e da resolução do experimento.

Segundo Werkema e Aguiar (1996a), os objetivos de um experimento planejado são:

- (i) determinar as causas que mais influenciam o efeito de interesse do processo;
- (ii) determinar as faixas de valores para os parâmetros de processo associados aos fatores controláveis, de modo a obter cada item de controle centrado no valor nominal almejado e com uma pequena variabilidade em torno deste valor.
- (iii) determinar as faixas de valores para os parâmetros de processo associados aos fatores controláveis, as quais minimizam as ações dos fatores não-controláveis sobre os itens de controle do processo.

### 2.1.1 Roteiro para realização de projetos de experimentos

O Projeto de Experimentos pode ser sistematizado em passos, segundo Montgomery (1997) e Werkema e Aguiar (1996a) com as seguintes etapas apresentada na Figura 01.

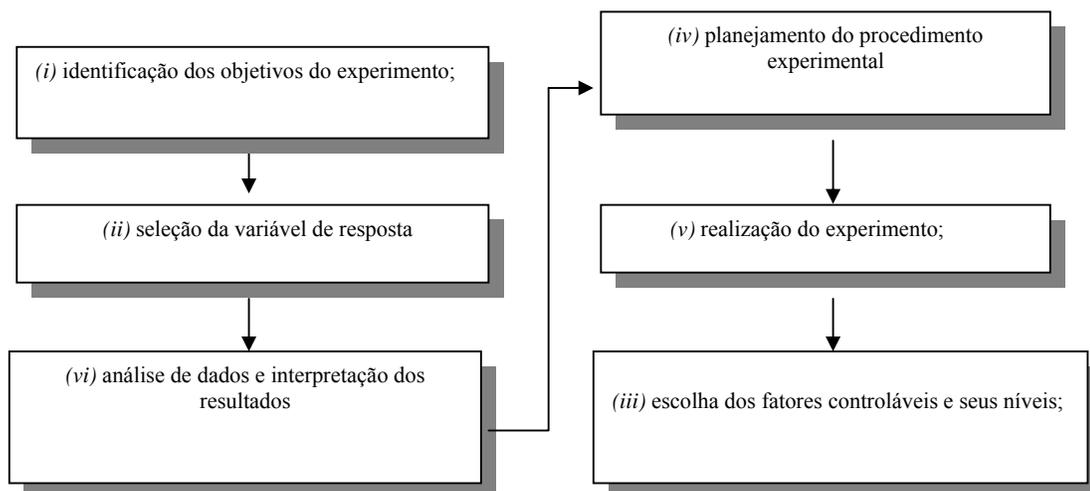


Figura 1 – Sistematização de um Projeto de Experimentos

Fonte: Adaptado de Montgomery (1997) e Werkema e Aguiar (1996a)

De posse dos parâmetros de processo otimizados, pode-se propor melhorias no processo elaborando-se um Plano de Ação, envolvendo a equipe participante dos estudos, no ambiente da fábrica. Executando-se as ações sugeridas, cabe então apresentar os resultados e comprovar a eficiência dos estudos.

## **2.2 Modelo de projeto de experimentos**

As etapas principais necessárias para o desenvolvimento de um experimento industrial, são as seguintes (Ribeiro 2000b):

- (i) identificação do problema;
- (ii) planejamento e execução do experimento;
- (iii) modelagem da variável de resposta e da sua variância;
- (iv) escolha da função e de critérios a serem utilizados na otimização do experimento;
- (v) formalização da otimização.

A seguir serão apresentadas algumas considerações discutidas em Montgomery (1991), e Ribeiro (2000b) para cada uma das cinco etapas.

### **2.2.1 Identificação do problema**

A identificação do problema está diretamente relacionada à definição dos objetivos e das condições de execução do experimento. Os objetivos devem ser não tendenciosos, específicos, mensuráveis e de impacto prático. Para ser não tendencioso, a equipe de experimentadores deve ser formada por pessoas especialistas na área. Para que os objetivos sejam específicos e mensuráveis, é preciso que os mesmos sejam detalhados e situados de maneira que fique claro onde se pretende chegar. Para que se tenha impacto prático, é preciso que as conclusões dos resultados do experimento sejam realmente implantadas, e também é muito importante garantir que todas as partes envolvidas no experimento concordem com os objetivos e com os critérios que determinarão se os objetivos foram alcançados.

### 2.2.2 Planejamento e execução do experimento

Segundo Werkema & Aguiar (1996a) os projetos experimentais podem ser classificados: (i) pelo número de fatores a serem estudados, (ii) pela estrutura utilizada (blocos, fatoriais, hierárquicos ou aninhados, ou para superfície de resposta) e (iii) pelo tipo de informação fornecida (estimativa de efeitos, da variância ou mapeamento empírico dos parâmetros de resposta).

Escolhe-se adequadamente o tipo de projeto de experimento, visando-se obter economia no número de rodadas experimentais, e calculando-se com precisão adequada as estimativas dos efeitos de interesse e da variabilidade do erro experimental. A escolha também deve atender aos objetivos e às restrições físicas e econômicas de cada experimento.

Segundo Ribeiro (2000b) e Montgomery (1991), para que o objetivo do experimento seja alcançado, é preciso que se conduza um planejamento adequado. O projeto experimental deve ser selecionado adequadamente, o experimento deve ser conduzido com sucesso, os dados devem ser analisados corretamente e os resultados devem ser reportados eficientemente. Algumas considerações relevantes acerca da etapa de planejamento e execução do experimento são:

- (i) considerar informações prévias que possam auxiliar os objetivos do trabalho, tais como informações de experimentos anteriores, dados coletados por observação de rotina, leis físicas que venham a reger o fenômeno em estudo e que facilitem a sua compreensão e opiniões de especialistas no assunto;
- (ii) considerar as restrições experimentais. Como exemplos de restrições, pode-se citar a dificuldade de ajuste das variáveis de controle, o tempo disponível para realização do experimento e as regiões experimentais que comprometam a segurança do experimento, não devendo portanto, ser exploradas;
- (iii) a equipe deve tentar avaliar previamente quais interações são de ocorrência esperada. A avaliação é subjetiva e inclui interações de pares de fatores de controle; e as interações entre três ou mais fatores geralmente não são consideradas;
- (iv) as variáveis de resposta escolhidas devem refletir, da melhor maneira possível, a característica de qualidade ou quantidade de interesse a ser mensurada a partir das unidades experimentais. Determinam-se, também nesta etapa, erros de medição associados às variáveis de resposta, bem como a capacidade dos equipamentos utilizados em sua medição;

- (v) fatores mantidos constantes são aqueles cujo efeito sobre as variáveis de resposta é potencialmente desprezível ou não é de interesse primário no experimento. Fatores de ruído não são controláveis, podendo ou não ter efeito sobre as variáveis de resposta; por serem não controláveis, não podem ser mantidos a um nível constante durante todo o experimento. Nesta etapa, desenvolvem-se estratégias de controle para fatores mantidos constantes e estratégias de medição para fatores de ruído. Para que fatores de ruído não interfiram nos resultados do experimento, recomenda-se a aleatorização das rodadas experimentais;
- (vi) para a escolha do projeto experimental mais adequado, consideram-se fatores como o tamanho da amostra a ser coletada, a seqüência de execução dos tratamentos e o custo do experimento. A escolha do projeto experimental apropriado aos objetivos e limitações do experimento é normalmente feita com o apoio de estatísticos. Nesta etapa, congregam-se todas as informações levantadas nos passos anteriores; ou seja, fatores de controle e seus níveis,
- (vii) método de coleta de dados, materiais, duração e número de rodadas do experimento.
- (viii) é muito importante a pré-rodagem de certas combinações do experimento. Na pré-rodagem, são avaliados aspectos como a segurança, a facilidade de ajuste dos fatores controláveis e limitações de processo não previstas pela equipe de projeto. Por exemplo, um tratamento experimental que especifica ajustes altos de pressão e temperatura pode resultar inviável quanto à segurança de operação do equipamento. Na pré-rodagem, testa-se o ponto central do projeto ou alguns tratamentos potencialmente problemáticos do experimento. As correções resultantes da pré-rodagem visam possibilitar uma execução mais rápida do experimento, a um custo menor. O processo de execução do experimento deve ser monitorado para garantir a fidelidade ao projeto original. Erros na execução do experimento podem comprometer sua validade estatística. Nesta etapa, registram-se dados referentes às condições de experimentação, com vistas à identificação de fatores não controláveis (RIBEIRO-2000b E MONTGOMERY-1991).

### **2.2.3 Modelagem da variável de resposta e da sua variância**

A modelagem matemática através de métodos estatísticos para análise dos dados obtidos do Projeto de Experimentos, consiste no desenvolvimento de modelos de regressão para a média e variância das respostas observadas no experimento. Nesta etapa, é importante elaborar gráficos dos efeitos dos fatores principais e das interações significativas, com vistas a facilitar a compreensão dos resultados do experimento.

### **2.3 Análise de variância**

A Análise de Variância (*ANOVA – Analysis of Variance*) é uma das principais ferramentas estatísticas para a análise de dados obtidos em experimentos planejados. A

variância é uma medida de variabilidade, definida como o quadrado do desvio padrão. A notação utilizada para variância é  $\sigma^2$ , quando se refere à variância de uma população, e  $s^2$ , quando se refere à variância de uma amostra extraída desta população (RIBEIRO,2000).

Considere a situação onde deseja-se comparar várias médias oriundas de resultados observados de diferentes níveis de um mesmo fator. Os resultados observados podem demonstrar a existência de dois tipos de variabilidade. A variabilidade existente dentro das amostras de cada tratamento e a variabilidade existente devido à diferença das médias dos tratamentos. A soma das duas variabilidades é denominada variabilidade total, que corresponde à variabilidade de todas as amostras de todos os tratamentos.

A análise de variância pode ser definida como um procedimento estatístico, utilizado para decompor a variabilidade total em componentes de variabilidade, atribuídos a determinadas fontes de variação (ou seja, a determinados tratamentos experimentais), com o objetivo de comparar as médias dos resultados associadas às fontes de variação através de testes de hipótese apropriados (MILTON E ARNOLD, 1995).

### 2.3.1 Modelo estatístico

O objetivo da ANOVA é testar se o efeito de cada fator (A ou B) ou a interação entre eles (AB) são significativos. Ao analisar-se projetos fatoriais com mais de dois fatores, utiliza-se a análise de variância para  $k$  fatores, com o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \dots + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

para:  $i = 1, a$ ;  $j = 1, b$ ;  $k = 1, c$ ;  $l = 1, n$ ;

onde:  $\mu$  = é a média geral;

$\tau_i$  = é o efeito do  $i$ -ésimo nível de A;

$\beta_j$  = é o efeito do j-ésimo nível de B;

$(\tau\gamma)_{ik}$  = é o efeito da interação AC;

$(\beta\gamma)_{jk}$  = é o efeito da interação BC;

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  = é o efeito da interação entre os valores ABC;

$\varepsilon_{ijkl}$  = é o erro aleatório.

As hipóteses a serem testadas são:

Para o fator A:             $H_0: \tau_i = 0$

$H_1: \tau_i \neq 0$  para algum  $i$ .

Para a interação AB:     $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$

$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0$  para algum  $ij$ .

Para a interação ABC:    $H_0: (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0$

$H_1: (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$  para algum  $ijk$ .

### 2.3.2 Tabela ANOVA

A análise estatística dos projetos fatoriais com dois fatores e efeitos fixos é feita através da Análise da Variância (ANOVA) para dois fatores.

A tabela 1 mostra dados típicos de experimentos fatoriais com dois fatores. Os dois fatores são representados por A e B, os níveis dos fatores por a e b, n são as repetições do experimento.

Fator A            a níveis;

Fator B            b níveis;

Fator C c níveis;

etc., todos com n observações por parcela.

O número total de observações é

$$N = a \times b \times c \times \dots \times n$$

A tabela ANOVA para projetos cruzados de três fatores é representada na tabela 2.

Tabela 1 - Dados típicos de experimentos fatoriais com 2 fatores

		Fator B			
		1	2	...	b
Fator A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$	...	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$	...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	...	...	...	...	...
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$	...	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

Fonte: adaptação de Werkema & Aguiar (1996a)

Tabela 2 - Tabela ANOVA para projetos cruzados de três fatores

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias Quadradas	Teste F
A	SQA	(a-1)	MQA	MQA/MQR
B	SQB	(b-1)	MQB	MQB/MQR
C	SQC	(c-1)	MQC	MQC/MQR
AB	SQAB	(a-1)(b-1)	MQAB	MQAB/MQR
AC	SQAC	(a-1)(c-1)	MQAC	MQAC/MQR
BC	SQBC	(b-1)(c-1)	MQBC	MQABC/MQR
ABC	SQABC	(a-1)(b-1)(c-1)	MQABC	
Erro	SQR	abc(n-1)	MQR	
Total	SQT	abcn-1		

Fonte: adaptação de Werkema & Aguiar (1996a)

Se o valor da equação Teste F na tabela 2 acima for maior que o valor de  $F_{(p-1, N-p, \alpha)}$  tabelado, significa que o efeito correspondente é significativo.

## 2.4 Análise de regressão

A Análise de Regressão, segundo Werkema & Aguiar (1996b) e Neter (1990), é uma técnica estatística que processa as informações contidas em um conjunto de dados de forma a gerar um modelo que represente o relacionamento existente entre os parâmetros de interesse de um processo: os parâmetros de entrada (ou explicativas) e os parâmetros de saída (ou dependentes). Ela pode ser utilizada para vários objetivos, como por exemplo: estimação, controle, predição, e descrição de um processo, através da utilização de uma equação que sumarie um conjunto de dados.

A análise de regressão processa as informações contidas em um conjunto de dados de forma a gerar um modelo que represente o relacionamento existente entre as variáveis de entrada (explicativas) e as de saída (dependentes), de um processo ou produto.

Segundo Montgomery (1997) e Werkema & Aguiar (1996b), a análise de regressão pode ser utilizada para: (i) descrever um conjunto de dados ou um relacionamento entre variáveis de interesse; (ii) predizer valores de variáveis de interesse; (iii) controlar os valores de variáveis de interesse; (iv) estimar parâmetros desconhecidos de equações que representem relacionamentos de variáveis de interesse. Montgomery (1997) acrescenta, ainda, que a análise de regressão pode ser utilizada para analisar dados que provenham de experimentos planejados ou não. Na seqüência, são apresentados alguns conceitos de análise de regressão relevantes para este trabalho, baseados em Werkema & Aguiar (1996b). Maiores detalhes sobre o tema podem ser encontrados em Montgomery (1997).

Na seqüência, apresentam-se conceitos relevantes para este trabalho, baseados em Werkema e Aguiar (1996b).

A **regressão linear simples** adota o modelo da equação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad (12)$$

Onde:  $\beta_0, \beta_1$  = parâmetros da relação linear (intersecção e inclinação da reta);

$\varepsilon$  = erro aleatório (diferença entre valor observado e valor previsto);

$Y$  = valor previsto pela reta  $\beta_0 + \beta_1 X_1$  ( variável dependente ou variável de resposta);

$X$  = variável independente, ou explicativa.

Na **regressão linear múltipla**, envolve-se mais do que uma variável explicativa  $X$ , e o seu modelo é representado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (13)$$

Neste caso, a variável de resposta  $Y$  está relacionada a  $k$  parâmetros explicativos e os parâmetros  $\beta_j, j = 0, k$  são conhecidos como coeficientes de regressão.

O **coeficiente de determinação  $R^2$** , segundo Werkema (1996b), é determinado pela equação abaixo e nos explicita a proporção da variância total no parâmetro de resposta explicada pelo modelo de regressão:

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (14)$$

Onde:  $SQR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$  é a soma dos quadrados totais;

$SQR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2$  é a soma dos quadrados devida aos resíduos;

$Y_i$  = é a  $i$ -ésima observação

$\bar{Y}$  = é a média das  $i$  observações;

$\hat{Y}_i$  = é a  $i$ -ésima observação prevista pelo modelo.

O coeficiente  $R^2$  é interpretado como a medida da explicação da variabilidade de  $y$  obtida pela utilização dos parâmetros explicativos  $X_1, \dots, X_k$  no modelo de regressão. Como em regressões simples, o  $R^2$  varia entre 0 e 1. Se  $R^2 = 1$ , todas as observações estarão sobre o hiperplano definido pelo modelo e, se  $R^2 = 0$ , não há nenhuma relação entre a variável de resposta e as variáveis explicativas. Contudo, um grande valor para  $R^2$  não implica, necessariamente, que o modelo ajustado seja adequado. É sempre possível aumentar o valor de  $R^2$  por meio da adição de novas variáveis explicativas ao modelo. No entanto, apesar do maior valor para  $R^2$ , nem sempre o novo modelo com mais variáveis explicativas será melhor que o modelo anterior, que não envolve estas variáveis. Tentando contornar este problema, é usual, para o modelo de regressão múltipla, utilizar o coeficiente de determinação ajustado  $R^2_{aj}$ , que leva em consideração o número de variáveis explicativas incluídas no modelo da equação 15.

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{SQR / (n - p)}{SQT(n - 1)} = 1 - \frac{n - 1}{n - p} (1 - R^2) \quad (15)$$

Onde:  $n$  = é o número de observações;

$p$  = é o número de parâmetros regressoras mais um.

Quando  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  forem muito diferentes, há a indicação de que há um excesso de variáveis no modelo.

#### 2.4.1 Análise da validade dos modelos

Considera-se que o modelo obtido através da regressão linear seja válido, segundo Werkema (1996b), quando:

- (i) o relacionamento entre  $y$  e  $x$  é linear, ou ao menos aproximado por uma linha reta na região do estudo;
- (ii) o erro tem média zero e variância constante: traçando-se os gráficos de resíduos contra níveis dos fatores e analisar a dispersão dos resíduos verifica-se que a dispersão não depende dos níveis dos fatores, ou seja, as faixas de dispersão dos resíduos para os dois níveis de cada fator são aproximadamente iguais;
- (iii) os erros não são correlacionados: verifica-se por meio dos gráficos dos resíduos contra o tempo, na ordem de coleta das observações, em que os resíduos devem apresentar-se de forma aleatória em torno do eixo horizontal. Caso apresentar resíduos positivos ou negativos ou padrões de alternância de sinais está indicado que as observações não são independentes;
- (iv) os erros seguem uma distribuição normal: em um gráfico de probabilidade normal para os resíduos, os pontos devem estar localizados aproximadamente em uma linha reta. WERKEMA(1996b).

## 2.5 QFD- Desdobramento da função qualidade

A utilização do *QFD-Quality Function Deployment* (Desdobramento da Função Qualidade) no meio industrial é uma excelente ferramenta que sistematiza a busca pela qualidade focada no cliente. Isto é atualmente extremamente relevante, em função da competitividade das empresas que querem buscar um melhor planejamento de seus produtos e serviços.

Segundo Cheng (1995):

A origem do QFD está no Japão, originário do grande crescimento das indústrias japonesas, principalmente a automobilística. Foram implementadas as atividades de garantia de qualidade, desde o projeto, devido às constantes mudanças dos modelos dos automóveis. O controle estatístico do processo (CEP) começou a ser considerado na gestão da qualidade total, entre 1960 e 1965.

Nesta época, iniciou-se a consolidação do conceito de Garantia da Qualidade no Japão, abrangendo todos os processos: identificação do mercado, projeto, processos, aquisição, fabricação, inspeção e vendas. Foi também introduzido o conceito de confiabilidade e, em 1966, foram iniciadas as primeiras tentativas de desdobramento da qualidade em empresas japonesas, divulgadas em 1972. Os resultados indicavam deficiências quanto aos métodos e ao conceito de como estabelecer a qualidade do projeto.

Em 1972 foi divulgada a matriz de qualidade utilizada pelo Estaleiro Kobe, no Japão, estabelecendo o método e o conceito da qualidade no projeto. Com a publicação do primeiro livro sobre QFD, de autoria de Mizuno e Akao, em 1978, os processos de desenvolvimento de novos produtos e atividades passaram a ser praticada na origem do processo “(CHENG, 1995).

Segundo Ribeiro (2000c), as definições de *QFD* podem ser:

- (i) é uma técnica de gestão, pois auxilia no gerenciamento de projetos simples ou complexos;
- (ii) é um método de planejamento, onde os esforços de engenharia são deslocados para a fase de planejamento;
- (iii) é um método de solução de problemas, listando O QUÊ precisa ser feito e COMO pode ser feito;
- (iv) facilita a modelagem do conhecimento, descobrindo o conhecimento técnico da equipe;
- (v) facilita a documentação das informações através do uso da matriz de dados;
- (vi) facilita o transporte de informações, pois as matrizes relacionam-se de forma seqüencial usa-se uma linguagem e uma lógica comum no seu preenchimento;
- (vii) fornece abertura a criatividade e inovações através de discussões multisetoriais em um ambiente de Engenharia Simultânea.

Segundo Cheng (1995), o *QFD* pode ser conceituado como o processo que visa buscar, traduzir, transmitir as exigências dos clientes em características da qualidade do produto por intermédio de desdobramentos sistemáticos. Tal processo inicia-se com a voz do cliente, passando pelo estabelecimento de funções, mecanismos, componentes, processos, matérias-primas, e estendendo-se até o estabelecimento dos valores dos parâmetros de controle dos processos.

Para a realização do trabalho, faz-se necessário fazer uma pesquisa de mercado visando-se obter a voz do cliente, e com a ajuda dos especialistas na área desdobram-se e priorizam-se os itens de qualidade demandada, com o uso de tabelas e matrizes.

As tabelas são cruciais, pois são as unidades elementares no *QFD*. São representadas graficamente pela forma triangular, e o significado de desdobramento na tabela é de detalhamento. A tabela é o detalhamento de algo, de forma agrupada e ordenada em níveis. Este algo pode ser qualidade exigida, função do produto, função da matéria-prima, e outros. O objetivo do desdobramento é permitir que o desconhecido se torne conhecido, o que é implícito seja explicitado ou o que é informal seja formalizado.

As matrizes são constituídas por duas tabelas, normalmente representadas por dois triângulos e um quadrado com abas, dando visibilidade às relações entre as duas tabelas. Estas relações podem ser qualitativas, quantitativas, e de intensidade. Quando a relação é do tipo qualitativo, denomina-se o processo de *extração*, se for quantitativo, o processo é dito de *conversão*, e se for de intensidade é dito de *correlação*.

A *extração* acontece quando se obtém uma tabela a partir de outra, ou seja, quando se obtém os elementos de uma tabela para outra. Por exemplo, pode-se citar que é usual extrair-se a partir da Tabela de Qualidade Exigida a Tabela de Desdobramento das Características de qualidade do Produto.

A *conversão* é utilizada nos processos quantitativos, quando se quer transmitir a importância dos elementos de uma tabela para outros elementos de uma outra tabela.

A *correlação* identifica as relações entre os elementos desdobrados do último nível das tabelas. O grau das correlações é indicado por símbolos, tais como forte, fraca e possível. Na análise das correlações, pode ocorrer a identificação de colunas ou linhas em que a correlação é totalmente inexistente, significando que algo foi omitido ou está em excesso (CHENG 1995).

O Desdobramento da Qualidade se refere às cartas, tabelas e matrizes descritivas que são utilizadas na projeção da qualidade demandada. O Desdobramento da Função é relacionado à

“voz do especialista”, identificando a função básica atribuída ao produto normalmente não compreensível pelo cliente.

Desta maneira, o QFD é empregado no desenvolvimento do produto, incorporando no projeto as necessidades dos clientes. Ele utiliza uma técnica de matrizes, partindo dos requisitos ou demanda dos clientes, através de um processo de desdobramento, transformando-os em especificações técnicas do produto.

Este processo deve ser realizado por uma equipe multidisciplinar, desenvolvendo uma compreensão comum sobre o produto, com os membros se tornando comprometidos com as ações resultantes do desdobramento da qualidade.

Pela abordagem de Ribeiro, Echeveste e Danilevicz (2000) elabora-se um modelo conceitual do QFD:

Pesquisa de Mercado obtendo a voz do cliente;  
Matriz da Qualidade;  
Matriz das Partes;  
Matriz dos Processos;  
Matriz das Características das Partes;  
Matriz dos Parâmetros dos Processos;  
Matriz dos Recursos Humanos;  
Matriz dos Recursos da Infra-estrutura;  
Matriz dos Custos;  
Planejamento da Qualidade.

No presente trabalho, por questão de relevância, serão apresentadas as matrizes:

- Matriz das Características das Partes; representando a voz do cliente;
- Matriz dos Parâmetros dos Processos; representando a voz do especialista.

### **2.5.1 Pesquisa de mercado: a voz do cliente**

Como etapa inicial do desdobramento da qualidade, deve-se realizar a pesquisa de mercado, objetivando-se obter a voz do cliente.

Segundo Ribeiro, Echeveste e Danilevicz (2000c), as atividades da pesquisa de mercado são:

- identificação do cliente;
- ouvir a voz do cliente ( Pesquisa do mercado);
- desdobramento da qualidade demandada pelo cliente;
- importância dos itens de qualidade demandada (IDi).

A identificação dos clientes tem como objetivo definir o público-alvo que se deseja atingir. Pode-se segmentar o mercado por classe, idade, localização geográfica, etc. O processo de manufatura deve levar em consideração as preferências do consumidor, assegurando qualidade superior e baixo custo. Embora o processo de desenvolvimento seja realizado pela empresa, é o cliente que determina o sucesso ou a falha de um produto, por esta razão as empresas devem buscar meios de obter informações do consumidor, de modo a guiar o desenvolvimento desde a fase de planejamento até o produto final.

Quando a pesquisa de mercado é orientada para o levantamento da qualidade demandada, as etapas recomendadas por Ribeiro, Echeveste e Danilecicz (2000c) são: i) identificação do problema e objetivos da pesquisa; ii) planejamento da pesquisa; iii) questionário aberto e árvore da qualidade demandada; iv) questionário fechado e priorização da qualidade demandada.

O questionário aberto é aplicado a um número de pessoas com o objetivo de um levantamento de possíveis alternativas para o questionário fechado. São feitas questões amplas (perguntas abertas) que deverão atender a objetivos primários e secundários.

A partir dos resultados do questionário aberto, a equipe de pesquisa deve organizar as respostas utilizando uma estrutura de árvore, refletindo o desdobramento da qualidade demandada. Os itens de qualidade demandada podem ser organizados em uma estrutura hierárquica, contemplando níveis primário, secundário, terciário. Geralmente os itens do nível

primário são os perguntados no questionário aberto, enquanto que os itens secundários e terciários são revelados durante a análise das respostas do questionário aberto.

Questionário fechado é uma etapa quantitativa, onde os pesos poderão ser atribuídos aos itens de qualidade demandada. Ele irá questionar qual a importância o cliente atribui a cada item do nível secundário, assim como avaliar a importância atribuída aos itens terciários.

### 2.5.2 Matriz da qualidade

A matriz mais conhecida chama-se usualmente de Matriz da Qualidade, constituída pela Tabela de Desdobramento da Qualidade Exigida e pela Tabela de Desdobramento da Característica da Qualidade.

Para a identificação dos FCs (fatores controláveis) utiliza-se a matriz causa e efeito (semelhante as matrizes de QFD), de maneira a simplificar o entendimento do problema e das causas de origem. O esquema desta matriz está representado na figura 2:

A definição dos FCs é tomada como base no índice de priorização revisado (IPR) obtido da seguinte maneira:

- identificar os PPs que afetam os VRs;
- quantificar a intensidade do relacionamento entre os PRs e PPs utilizando uma escala pré-determinada;
- obter os índices de priorização ( $IP_j$ ) através da equação abaixo:

$$IP_j = \sum_{i=1}^I (IR_i X R_{ij}), \quad j = 1, J \quad (17)$$

Onde:  $IP_j$  é o índice de priorização do  $j$ -ésimo PP;

$IR_i$  é a importância relativa da  $i$ -ésima PR;

$R_{ij}$  é a intensidade do relacionamento entre o  $j$ -ésimo PP e a  $i$ -ésima VR;

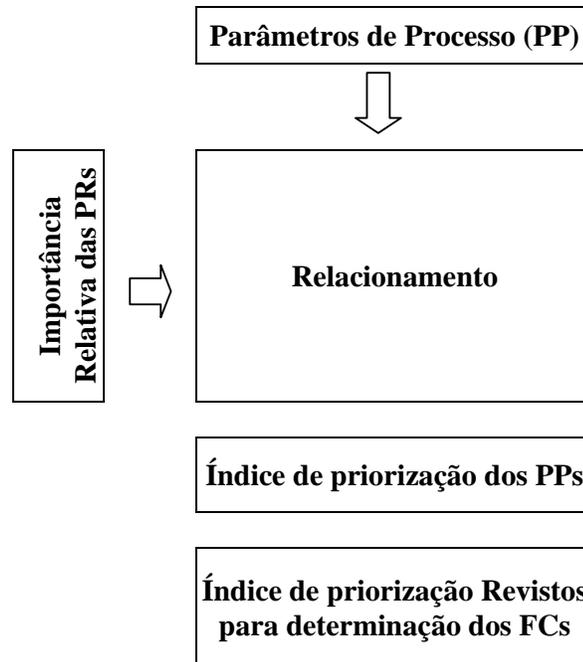


Figura 2 – Modelo conceitual da Matriz de QFD para a escolha dos FCs

Fonte: adaptado de Ribeiro e Caten (2000c)

- Definir as facilidades de ajuste para cada PP relativos ao experimento, utilizando-se uma escala pré-determinada;
- Obter o Índice de Priorização Revisos  $IPR_j$  através da equação 18:

$$IPR_j = IP_j \times FA \quad (18)$$

Onde:  $IPR_j$  é o índice de priorização do  $j$ -ésimo PP;

$IP_{ji}$  é o índice de priorização do  $j$ -ésimo PP;

$FA$  é a facilidade de ajuste do  $j$ -ésimo PP;

Com o  $IPR$ , define-se a ordem de priorização dos PPs, e os PPs de valores maiores são escolhidos como FCs do experimento. O planejamento do experimento é completado então baseando-se nestes FCs, elaborando-se então a matriz do experimento.

## 2.6 Definição e usos dos alto-falantes

Sette Silva (1996) define o alto-falante como um aparelho que tem por objetivo transformar o sinal elétrico (aplicado nos terminais) em som (ondas sonoras). Ele é constituído basicamente por uma estrutura ferromagnética (chamada de núcleo ferromagnético), por um ímã permanente e por um sistema móvel (composto por uma bobina, cone, calota, centragem e suspensão). A bobina fica localizada inserida no entreferro, conforme demonstrado na Figura 3.

Ele também é definido por Small (1971) como um transdutor, que transforma energia elétrica em energia acústica. Ao circular a corrente alternada pela bobina, gera-se uma força dinâmica, provocando deslocamento do conjunto móvel, bobina e cone, que originam pressões e depressões no ar. Essas variações de pressão chegam aos tímpanos dos ouvidos, causando a sensação de audição.

López (1994) e Hernandez (2001) definem transdutor eletroacústico como um dispositivo conversor de energia elétrica em acústica, ou ao contrário. Se a conversão de energia é no sentido do elétrico para o acústico, o transdutor leva o nome de emissor. Caso a conversão seja no sentido oposto, o transdutor se chama de receptor. O processo de conversão sempre necessita de um meio mecânico, isto é, um meio móvel, chamado de diafragma, ao qual pode-se associar parâmetros mecânicos tais como força e velocidade.

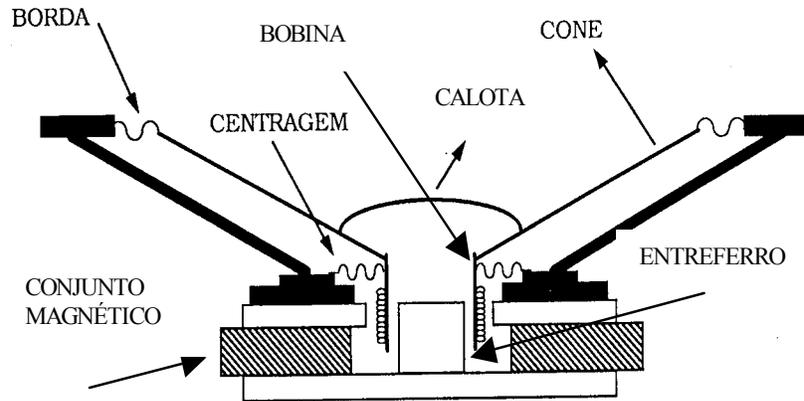


Figura 3 – Esquema do Alto-falante em corte  
 Fonte: Hernandes (2001).

Segundo Vassalo (1985), conforme for o valor da corrente modulada aplicada à bobina móvel, estabelece-se na mesma um fluxo magnético cuja densidade dependerá da mencionada corrente, do seu número de espiras e das características geométricas e magnéticas do circuito magnético do alto-falante. A bobina está localizada no entreferro e está imersa no campo magnético produzido pelo ímã permanente. Ao ser percorrida por corrente alternada, a bobina produzirá um campo magnético que interage com o campo magnético do ímã permanente. Assim, produz-se a vibração da bobina para diante e para trás, de acordo com o sentido da corrente que a percorre. A bobina então arrasta o diafragma (ou cone) produzindo neste as compressões ou depressões do ar em uma ou outra face do cone.

Como nenhum alto-falante tem condições de vibrar fielmente em toda a faixa de áudio, foram desenvolvidos alto-falantes específicos para graves, médios e agudos. Estes alto-falantes trabalham em faixas de frequências diferentes, e são classificados assim como *woofers* e *tweeters*. *Woofers* são alto-falantes que trabalham entre baixas e médias frequências (20 Hz a 6 kHz) enquanto que os *tweeters* trabalham na faixa dos médios a altas frequências (1-20 KHz) e normalmente utilizam diafragmas em forma de domo (STAROBIN,1997).

Um sistema de alto-falantes é composto pela soma dos alto-falantes, (composta pelos woofers e tweeters), das caixas de som (cabines onde os alto-falantes são montados, podendo haver aberturas ou não) , dos *baffles* (parte frontal das caixas onde há a estrutura de suporte dos alto-falantes), das cornetas e dos *crossovers* (são dispositivos eletrônicos que filtram e distribuem ao sistema de som o sinal elétrico na frequência desejada).

Moscal (1994) classifica os alto-falantes como produtores ou reprodutores. Enquanto que os Produtores são dedicados a uma certa faixa de frequência, os Reprodutores tentam recriar o som do sinal com precisão total. Para um falante reprodutor ser capaz de reproduzir todas as frequências de 20Hz a 20KHz igualmente, é praticamente impossível, por causa das combinações diferentes de materiais e diâmetros de cone. Entretanto, são utilizados para alguns instrumentos musicais onde são escolhidas faixas que acentuam a resposta de frequência do instrumento dando características tonais desejadas. Estas características tonais são obtidas escolhendo-se os materiais adequados na fabricação do cone, da bobina, da suspensão e certas características de fabricação.

Os alto-falantes Reprodutores são feitos para ter resposta de frequência suave em toda a sua faixa efetiva. Para ter-se uma resposta de frequência abrangente, as caixas de alto-falante utilizam combinações de alto-falantes de diâmetros diferentes, como por exemplo um de 15 polegadas para baixas frequências, um de 10 polegadas para médias e um de 3 polegadas para altas. Isto é feito regularmente em caixas residenciais.

As caixas acústicas têm como função primeira isolar a onda sonora frontal da onda posterior, no alto-falante, que por estarem defasadas tendem a se cancelar, principalmente nas frequências baixas, que possuem maior comprimento de onda. Segundo Sette Silva (1992) as caixas tipo suspensão acústica são constituídas de um gabinete totalmente fechado, exceto pelas aberturas necessárias à instalação dos transdutores, o que deve ser feito com todo o cuidado no sentido de evitar vazamentos de ar. Estes vazamentos também podem ser causados

pelo anel de suspensão externa, quando feito de tecido com trama excessivamente aberta. Resolve-se este problema aplicando um impermeabilizante que não perca a flexibilidade após a secagem.

A caixa de som é um elemento fundamental num projeto acústico. É composta por uma estrutura que aloja e suporta todos os outros elementos, e é geralmente feita de aglomerado ou madeira, com acabamento de laminado de madeira natural ou vinil. As dimensões internas da caixa devem ser calculadas com precisão, pois é o seu volume interno que afeta o desempenho dos alto-falantes.

A caixa funciona como uma bomba de ar: quando o cone é movimentado para a frente, o ar encontrado em sua frente é comprimido, e o ar atrás dele é expandido. O ar comprimido é forçado para fora em direção à zona de audição, e neste movimento físico são geradas as ondas sonoras.

A caixa de som deve ser projetada de acordo com as características de desempenho dos alto-falantes individualmente. Se um *woofer* com suspensão rígida tem um comportamento diferente de outro com suspensão macia, ou um *woofer* com ímã permanente muito forte é diferente de outro com ímã permanente fraco e com bobina mais longa, deve-se adaptar o projeto da caixa a estas situações. Para projetar-se caixas acústicas os profissionais do áudio coletam informações técnicas em trabalhos científicos dispersos e em publicações do ramo. Um dos primeiros livros a abordar detalhadamente o projeto de caixas acústicas pelo método de Thiele-Small é o livro de Vance Dickason, *Louspeaker Design Cookbook*.

A *performance* requerida pelos sistemas de alto-falantes é a reprodução fiel abrangendo todas as faixas de frequências captadas pelo ouvido humano, ou seja, de 20 Hz a 20 Khz, numa variação dinâmica de 100 dB, e a habilidade de reproduzir níveis de pressão sonora até próximo do limiar de conforto humano de 120 dB. Outros critérios são: produtos com baixa distorção, incluindo timbre, fase e harmônicos. Também devem ser livres de ruídos

operacionais, como zumbidos mecânicos e turbulências de ar.

Os alto-falantes para tons agudos (*tweeters*) devem emitir em ângulos de grande abertura, pois, ao contrário dos alto-falantes de graves que os sons são emitidos em todas as direções, os tons agudos são transmitidos somente em linha reta. A menos que medidas especiais sejam tomadas, somente os ouvintes posicionados próximos dos alto-falantes irão notar a perspectiva de audição da reprodução estereofônica, que é transmitida pelos tons médios e agudos.

Os alto-falantes para tons graves (*woofers*) têm uma frequência de ressonância muito baixa, de maneira a poderem produzir as notas mais graves de áudio. Para estes alto-falantes, se aplica um sinal de frequência muito baixa, e todo o diafragma se desloca, proporcionando um rendimento excelente para estas notas. Entretanto, ao ser aplicado um sinal de frequência elevada, só uma pequena parte do diafragma, periférica à bobina móvel, irradia energia acústica; o resto do diafragma se move de forma independente ou então não se move. Os alto-falantes de graves proporcionam baixo rendimento por notas de frequência elevada (agudas).

A curva de resposta de um alto-falante de tons graves, segundo Vassalo (1985) deve representar um máximo em aproximadamente 20 Hz, no limite inferior ao limite de áudio, e a parte reta da curva de ressonância idealizada não deve passar de 3000 Hz, por apresentar uma frequência de corte de 4000 Hz. Em unidades compostas por mais de dois alto-falantes, a faixa passante do alto-falante de graves só alcança valores em torno de 1000 Hz. Para obter as mencionadas respostas nesses alto-falantes, é preciso a montagem em caixas acústicas ou *baffles*.

O diâmetro para os alto-falantes de graves deve ser, pelo menos, de 12 polegadas, embora existam unidades com dimensões menores com excelentes resultados. O diafragma deve ser rígido, mas de suspensão suave, razão porque estes alto-falantes possuem corrugações finas e flexíveis na parte superior do diafragma.

Os alto-falantes elípticos, conforme apresentado na Figura 4, são o resultado da combinação de dois alto-falantes de diâmetros diferentes, com seção exponencial visando favorecer as respostas de alta-freqüência. Este tipo de alto-falante não soluciona totalmente a reprodução de toda a gama de áudio, posto que a resposta de graves é diferente. Entretanto, é muito utilizado em aparelhos cujo espaço é reduzido e nos quais não exige muita qualidade na reprodução do som, como é o caso dos televisores e rádios. O alto-falante elíptico pode ser considerado como uma solução intermediária entre o uso de apenas um alto-falante simples e a combinação de vários com respostas para todas as freqüências de áudio.

Os alto-falantes coaxiais, conforme apresentado na Figura 5, são aqueles que reúnem em uma só unidade dois ou três alto-falantes, montados em um mesmo eixo. Um dos alto-falantes, o de menor diâmetro, destina-se à reprodução das notas agudas, e o de maior diâmetro é para a reprodução de graves. Deste modo, consegue-se num espaço reduzido uma resposta de freqüência plana para toda a faixa de áudio. Eles podem ser também fabricados com bobinas independentes, ou com bobina comum.

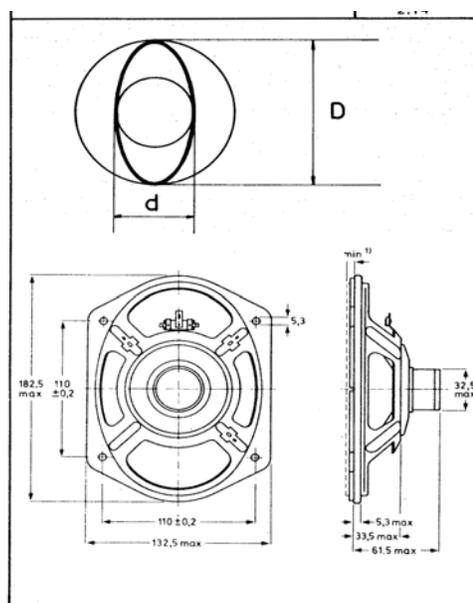


Figura 4 – Alto-falantes elípticos  
Fonte: Vassalo (1985)

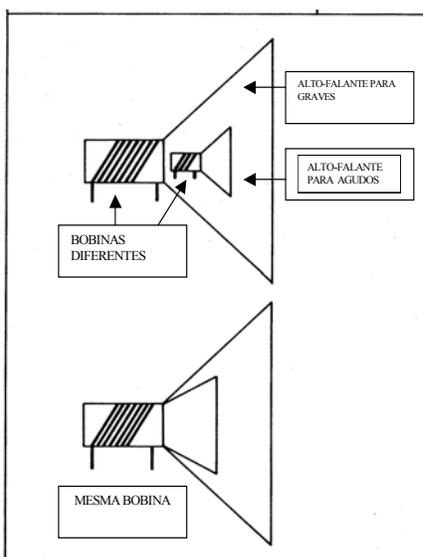


Figura 5 – Alto-falantes coaxiais

Fonte: Vassalo (1985)

### 2.6.1 Partes do alto-falante

O objetivo do alto-falante é transformar o sinal elétrico (aplicado no terminal) em som (ondas sonoras). A Figura 6 apresenta um alto-falante e seus componentes em um corte transversal. Esta transformação de sinais é feita através de uma força eletromagnética que atua sobre a bobina (Figuras 7 e 8). Quando a corrente elétrica alternada passa pelo fio da bobina que está imersa no campo magnético, surge uma força eletromagnética axial, que movimenta o conjunto móvel (formado pelo cone, calota, bobina principalmente) no sentido perpendicular ao fio da bobina.

A bobina irá então deslocar-se para cima e para baixo com a mesma frequência da corrente alternada aplicada. Como a bobina é colada no cone, este se movimenta junto com a bobina, na mesma frequência, e desloca o ar a sua frente de forma a produzir o som.

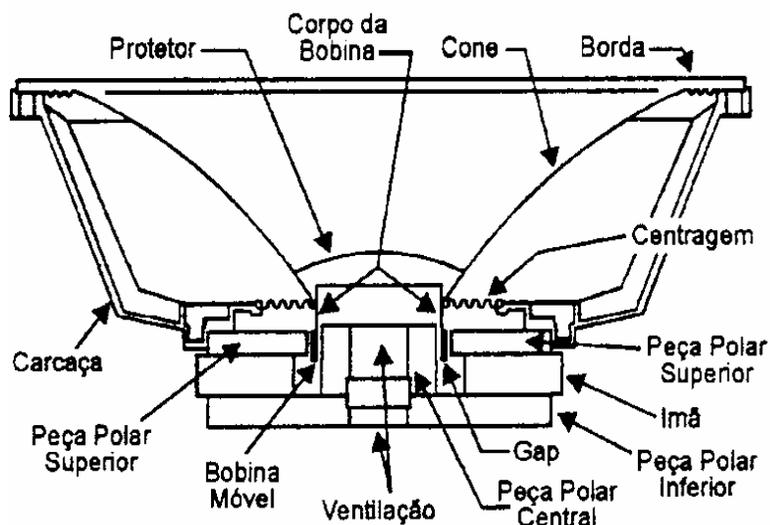


Figura 6 - Partes do Alto-Falante

Fonte: Manual Selenium

Na construção de um bom alto-falante a bobina móvel deve permanecer completamente imersa no campo magnético, mesmo nos movimentos de maior amplitude. Se a bobina não permanecer completamente imersa no campo magnético, o alto-falante irá produzir distorção sonora.

### 2.6.2 Circuito magnético

O circuito magnético, segundo Hernandez (2001), tem como objetivo concentrar e confinar um fluxo magnético na região onde a bobina é colocada, chamada de Entreferro. O entreferro é projetado para ter o menor comprimento possível, por isto a escolha da geometria é projetada com a menor dimensão possível para uma determinada demanda de campo magnético, e levando-se em consideração que os materiais empregados são de alto custo. Por isto a escolha da geometria e do material é muito importante para a composição do custo do produto. As peças do circuito magnético geralmente são coladas, e quando o ímã permanente é magnetizado a magnetização orienta-se no sentido paralelo ao eixo de simetria do ímã

permanente. Porém, como o ímã permanente está dentro do circuito magnético, as linhas de campo tendem a segui-lo.

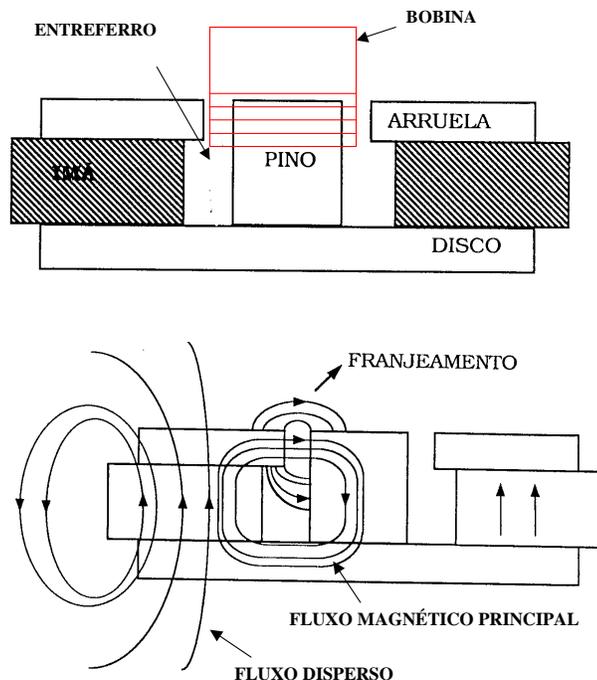


Figura 7 - Esquema em corte do conjunto magnético de um Alto-falante

Fonte: Hernandes (2001).

A geometria do circuito influencia diretamente na distribuição do fluxo magnético no entreferro, conforme mostram as Figuras acima. A estrutura ferromagnética deve confinar o fluxo magnético de forma que o mesmo cruze o entreferro. Por isso devem ser utilizados materiais ferromagnéticos com permeabilidade magnética alta (o aço doce, ferro com alto teor de carbono, geralmente é utilizado).

Para o ímã permanente, existem três materiais utilizados: os de *Alnico* (composto de ferro com alumínio, níquel e cobalto) que foi muito utilizado nas décadas de 40 a 60, porém foi abandonado devido ao seu custo elevado, os de Terras Raras: samário-cobalto ou neodímio-ferro-boro, e o mais utilizado atualmente, o ferrite de bário.

A bobina móvel, segundo Vassalo (1985), é formada por um enrolamento de fios de cobre enrolados em um conjunto cilíndrico. Tal tubo deve possuir características especiais, uma vez que tem que ser capaz de suportar os esforços originados durante a bobinagem como também os efeitos durante o movimento vibratório da bobina, mas por outra parte deve ser fabricado com um material de espessura muito reduzida, para reduzir ao mínimo a espessura do entreferro.

Quando a bobina é colocada dentro do entreferro do circuito magnético, e uma corrente alternada passa por ela, surge uma força que move axialmente a bobina, e dependendo da configuração do projeto a força será maior ou menor. A força eletromagnética gerada depende do campo magnético gerado pelo ímã permanente, do comprimento do fio no enrolamento da bobina e na corrente alternada aplicada na bobina.

### **2.6.3 O cone**

Segundo Hernandes (2001), o transdutor, através do campo eletromagnético e da força axial gerada, converte a energia elétrica em mecânica, e transforma-se em energia acústica, devido ao fato de que a bobina acoplada ao cone se movimentar junto com ela na mesma frequência, deslocando o ar a sua frente de forma a produzir o som. A forma cônica é escolhida pelo fato de se obter maior rigidez, sem deformação e com a menor massa, o que permite uma maior eficiência no alto-falante.

Os cones mais utilizados são os compostos de massa celulósica. A massa é composta de fibras de celulose de vários tipos, como: *kraft*, sulfite, algodão, linho, etc. A proporção das fibras na massa e a densidade do cone são responsáveis pelo seu desempenho mecânico e acústico. Para aumentar a resposta em altas frequências, utilizam-se resinas impregnantes no cone. Mais recentemente os cones de plástico (sendo o mais utilizado o de polipropileno) vêm se tornando muito populares. Sua estabilidade mecânica é melhor, eles são não-higroscópicos

e sua reprodutibilidade de fabricação é muito maior do que o cone celulósico. Como os materiais de fabricação dos cones são idealmente rígidos e possuem massa, a velocidade de propagação de ondas no material é finita.

Dependendo do tamanho e material do cone, até uma certa frequência, o cone funciona como um pistão rígido, ou seja, todos os seus pontos possuem mesma velocidade e deslocamento. Ultrapassando-se esta frequência o cone vibra em certas áreas, delimitadas em certas áreas onde não há vibração, oscilando com a frequência da força motriz. Cada uma destas regiões oscilantes funciona como fontes sonoras, e são denominadas de modos vibracionais. Elas são formadas porque as ondas se propagam no cone partindo da bobina, subindo até a borda superior do cone e retornando à bobina, formando ondas estacionárias. As formas e os materiais dos cones e das bordas influenciam na formação das ondas estacionárias.

Junto ao cone, existe outro componente do alto-falante: a calota. Ela é colocada acima da bobina, colada ao cone. Sua função básica é proteger a região do entreferro (evitando que caiam partículas sólidas) e, formar o som junto com o cone. Vários materiais são utilizados para fabricação das calotas: massa celulósica, tecido, polipropileno, alumínio, etc.

Os cones de alto-falantes possuem duas propriedades importantes a serem estudadas: a rigidez e as deformações elásticas e inelásticas dos materiais. Segundo True (1993), ao descrever um sistema de medição de compliância, torna-se necessário à definição de rigidez. Rigidez é a medida da resistência a deflexão mecânica, definida como a razão entre a força versus curva de deflexões, nas unidades SI em Newtons / metros. A rigidez pode mudar com o aumento da deflexão. A compliância é definida como sendo o inverso da rigidez. A rigidez é descrita por Horath (1995) como uma medida da habilidade de resistir a uma deformação ao receber uma carga. A rigidez é determinada pela razão entre o *stress* (intensidade das forças internas distribuídas ou forças componentes que resistem a mudança de forma de um corpo -

pode ser de tensão, de compressão ou de cisalhamento) pela deformação (mudança por unidade de comprimento das dimensões lineares de um corpo que sofreu *stress*) e esta razão é denominada de Módulo de Young.

$$E = \sigma / \xi \quad (20)$$

Onde: E = módulo de elasticidade

$\sigma$  = stress

$\xi$  = deformação

O módulo de elasticidade representa a rigidez do material, e pode ser de três tipos: módulo de tensão, de compressão ou cisalhamento, dependendo da força correspondente.

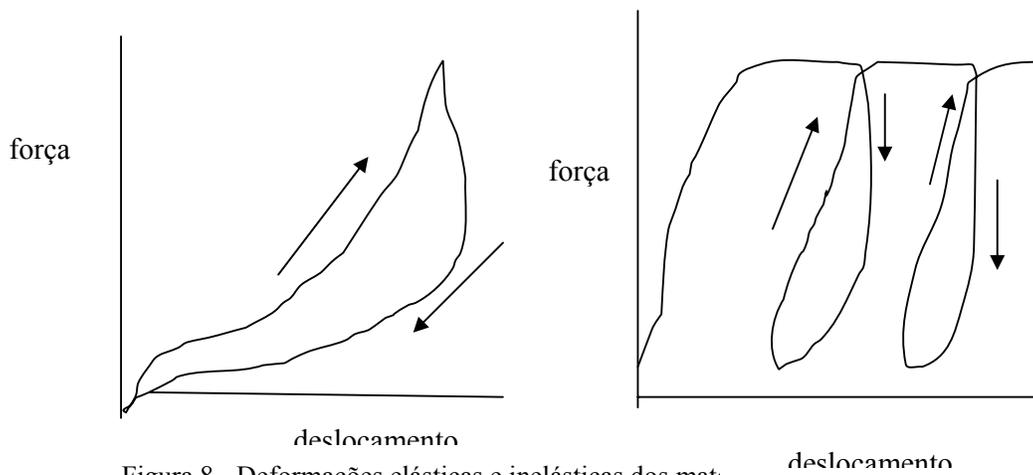


Figura 8 - Deformações elásticas e inelásticas dos materiais

Fonte: Horath (1995)

Borwick (1994) cita, utilizando um análogo elétrico, que a compliância é equivalente a capacitância (quando comparada a um circuito elétrico), e ela tem a capacidade de armazenar energia gasta no processo de deflexão. Quando a força é removida, a energia armazenada é removida de maneira similar a descarga de um capacitor.

Olson (1991) cita que energia potencial retilínea mecânica é associada a compressão de uma mola. A energia mecânica aumenta se a mola é comprimida, e diminui se ela é permitida se expandir. A compliância é o elemento mecânico que se opõe a mudança na força aplicada. Segundo Horath (1995), os materiais podem sofrer o fenômeno de perda de energia (histerese) devido às deformações elásticas ou inelásticas dos materiais, conforme ilustrado na figura 10.

Segundo Hernandez (2001), os materiais empregados na fabricação das centrages também sofrem a ação de histerese, conforme demonstrado na Figura acima, que podem causar distorções no alto-falante (alteração nos modos vibracionais). Isto não é bom devido ao fato de causar alterações nos parâmetros dos alto-falantes após o envelhecimento: o material de um produto pode alterar as suas características com o passar do tempo, e para isto ser evitado deve-se avaliar bem a qualidade dos materiais empregados.

#### **2.6.4 Conjunto suspensão e centragem**

Conforme Starobin (1997), a aranha (ou Anel de Centragem) e a Suspensão formam juntos a suspensão dos alto-falantes, contribuindo com a força restauradora do cone na proporção do seu comportamento de variação linear. As principais tarefas da suspensão são: manter o cone axialmente centrado no conjunto magnético e prover terminação final ao cone reduzindo suas vibrações estruturais.

O conjunto suspensão e centragem possui duas funções básicas: centralizar a bobina dentro do entreferro e funcionar como uma “mola” no alto-falante. Isto quer dizer que o movimento do cone, a frequência de ressonância, e outros parâmetros de qualidade do alto-falante dependem delas.

Além disso, segundo Olson (1991) o conjunto suspensão é responsável pela não-linearidade elástica do alto-falante que provoca distorções harmônicas, ou seja, as ondas

sonoras ficam distorcidas da sua forma senoidal original, efeito este que é percebido auditivamente, prejudicando a reprodução do som pelo alto-falante. A Figura 12 mostra o comportamento característico de um sistema de suspensão de alto-falante, onde vê-se que a pequenas amplitudes o sistema é linear porém em altas amplitudes o sistema de suspensão é não-linear. A suspensão é um prolongamento do cone, feito de massa celulósica ou outro material diferente: espuma, tecido resinado ou borracha, e depois colada no cone. O anel de centragem, também chamado de aranha (pois nos primórdios da fabricação dos alto-falantes tal peça era fabricada como uma armação de arame de formato parecido com uma aranha), é feito de tecido impregnado com resina, na forma de um disco com ondas concêntricas. A compliância do anel de centragem varia com a concentração da resina no banho, conforme a Figura 10, e também é responsável pela força restauradora (efeito mola) e, junto com a massa do sistema móvel, determina a frequência de ressonância do alto-falante.

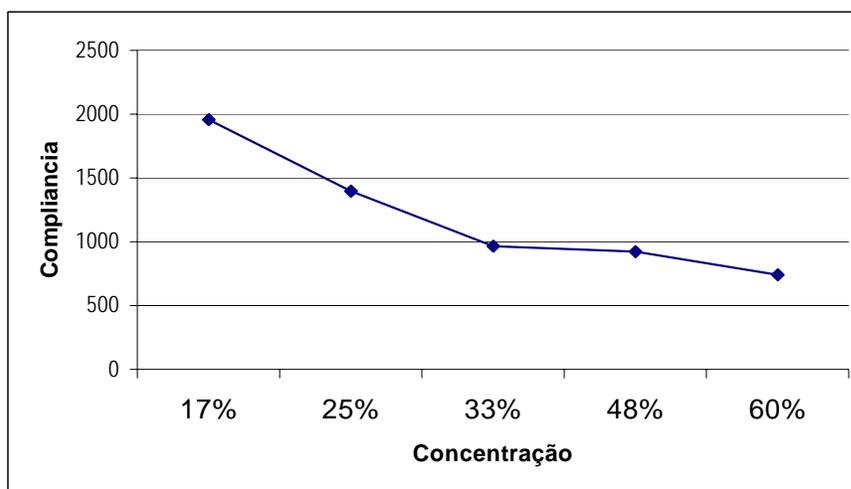


Figura 9 - Estudo da Variação de Concentração de Resina Vs. Compliância

Fonte: Eletrônica Selenium S./A

A falta de linearidade do anel de centragem ocorre a partir de um determinado ponto da excursão. No caso da fadiga elástica, se o anel não volta a sua posição normal, ou seja, se a bobina não ficar mais centralizada em relação ao campo magnético, haverá perda do fator de

força do falante e conseqüente diminuição da sensibilidade .

Na fabricação das aranhas (ou anel de centragem) utiliza-se tecido resinado moldado por ferramenta quente, que possui o perfil da aranha. O perfil possui os seguintes parâmetros: número de ondas, altura das ondas, largura das ondas, raio das ondas, altura da onda mais externa e tamanho do furo central.

Através destes parâmetros os engenheiros de produto podem modificar tanto a compliância quanto a excursão máxima da aranha. Para *sub-woofers* deve-se ter aranhas de compliância baixa e alta excursão. Já no caso de alto-falantes para médias frequências e de *tweeters* a situação é inversa. Com o perfil definido, deve-se escolher o tecido e a impregnação a serem utilizados na fabricação. Eles vão determinar basicamente, a compliância e a fadiga elástica.

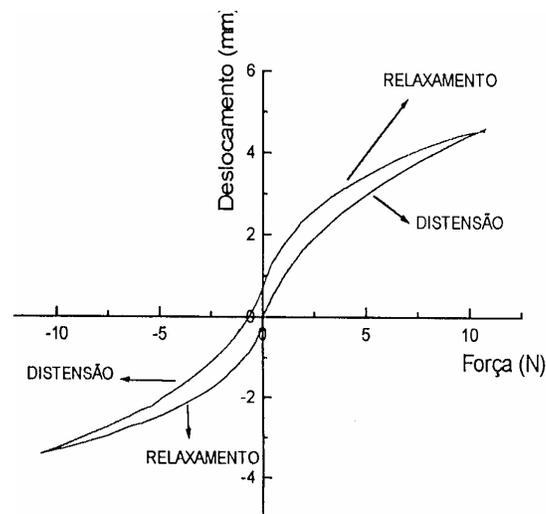


Figura 10 - Efeito de fadiga nos anéis de centragem

Fonte: Hernandes.(2001).

O tecido determina a ordem de grandeza da compliância e está intimamente ligado à fadiga. Já através da impregnação pode-se fazer o ajuste fino da compliância.

Para *woofers* e *sub-woofers* com grandes excursões do conjunto móvel, a fadiga e a não

linearidade são críticas, para tanto necessitam-se utilizar materiais e processos adequados no projeto do anel de centragem, visando garantir as características técnicas dos produtos por um tempo de utilização prolongado.

## **2.7 Caracterização dos alto-falantes**

Os parâmetros dos alto-falantes são fundamentais para caracterizar-se a qualidade de um produto: eles se baseiam em medições elétricas e acústicas e permitem ao projetista avaliar seu protótipo, identificar seu desempenho, avaliar os materiais empregados nos seus componentes. Através deles o fabricante mede as especificações técnicas dos seus produtos visando-se avaliar se o lote fabricado está dentro das especificações. O cliente também necessita destes parâmetros para dimensionar o seu sistema de som, e um fator importante é o fato de associar-se as medições à audição (avaliação subjetiva) do alto-falante.

Para tanto, utilizam-se os parâmetros tradicionais e os de Thielle-Small (Sette Silva, 1996). Os parâmetros tradicionais dos alto-falantes sempre foram pouco compreendidos pela maioria dos usuários que, não conseguindo utilizá-los em seus projetos, acabavam sempre por realizá-los empiricamente. Já os parâmetros de Thielle-Small são de fácil compreensão e podem ser utilizados por todos que disponham a dispender um mínimo de esforço para o aprendizado. Existe uma correspondência biunívoca entre os parâmetros tradicionais e os de Thielle-Small, o que implica que uns podem ser expressos em função de outros.

Como no alto-falante eletrodinâmico interagem fenômenos elétricos, mecânicos e acústicos, a análise destes parâmetros é complexa, e objetivando sistematizar o projeto, e melhor explicar o funcionamento do alto-falante, A.N. Thielle e Richard H. Small desenvolveram a teoria que originou os parâmetros de Thielle-Small.

As medições podem ser acústicas ou elétricas. A medição acústica é realizada em ambiente de campo livre (*free field*), campo difuso (reverberante) ou em ambiente comum (semi-reverberante). Em campo livre, não existe eco, ou seja, não existem reflexões das ondas sonoras emitidas pelo alto-falante nas paredes, fazendo com que o microfone capte apenas a onda emitida pelo alto-falante. Pode-se fazer as medições em campo aberto, mas para não ficar-se sujeito a variação das interpéries, constroem-se salas sem eco (câmaras anecóicas), em que suas paredes são forradas por um material que absorva as ondas sonoras, geralmente placas grossas de espuma.

Para isolar as ondas sonoras emitidas pela parte de trás do cone, as medições são realizadas com o alto-falante montado em sua caixa acústica ou em *baffle* padrão (sonofletor). O *baffle* padrão é feito de madeira, e seu desenho segue a norma NBR-5308 da ABNT e mostrado na Figura 13. Para tanto, um gerador de sinais é ligado a um amplificador que aplica um sinal elétrico ao alto-falante, com potência aplicada geralmente de 1 Watt. O sinal elétrico (tensão alternada) tem a sua frequência variada de 20Hz a 20KHz.

Para medir-se o nível de pressão sonora (SPL) utiliza-se um microfone colocado a um metro do cone, na direção do eixo do alto-falante. O microfone é conectado a um processador de sinais que grava e mostra as medições em uma tela, ou outro tipo de mostrador.

Para fazerem-se as medições elétricas, utiliza-se uma curva de impedância e uma curva de velocidade do diafragma *versus* frequência. Este método requer o uso de raio *laser* capaz de medir a velocidade do diafragma. Através dos valores da impedância e da velocidade calcula-se os parâmetros.

A norma NBR 5308 da ABNT (1982) cita as principais características mensuráveis de alto-falantes, e entre as definições importantes estão a resposta de frequência, a frequência de ressonância e a impedância dos alto-falantes. Esta norma prescreve métodos práticos e uniformes de medição de certas características de alto-falantes de modo que tenham

resultados claramente expressos e reproduzíveis.

Atualmente os modelos propostos são os parâmetros Tradicionais e os de Thiel-Small. O cálculo dos parâmetros de Thiel-Small (T-S) foi proposto por A. N. Thiel e R. H. Small em trabalhos publicados durante a década de 70.

Estes trabalhos visavam o projeto de uma caixa acústica tipo aberta (*vented box*) sobre a qual, até então, não se tinha domínio teórico. Os parâmetros foram calculados como base na analogia entre os circuitos elétricos das partes mecânica e acústica dos alto-falantes. Eles são derivados dos parâmetros tradicionais do alto-falante. Atualmente, os parâmetros T-S são utilizados para projetos de alto-falantes e de caixas acústicas.

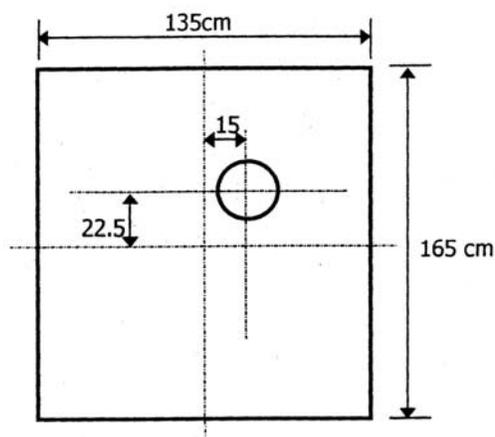


Figura 11 - esquema de construção de um *baffle*-padrão (sonofletor)

Fonte: Norma ABNT NBR 5302 (1982)

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

Os parâmetros tradicionais e suas unidades são:

$Mms$  = massa mecânica total (kg): é a massa do sistema móvel, composta de diafragma + bobina + suspensão + aranha e a massa de ar equivalente à impedância acústica.

$Cms$  = compliância mecânica total ( $\mu\text{m}/\text{N}$ ): refere-se a compliância da aranha e da suspensão associadas. Assim como a massa mecânica, o  $Cms$  é um parâmetro dinâmico.

$Rms$  = Resistência mecânica (Kg/s): é a resistência mecânica da suspensão, está relacionada ao transiente do alto-falante, ou seja, o tempo necessário para atingir o regime estacionário do seu movimento. Este parâmetro está associado ao amortecimento do movimento, ou seja, parte da energia mecânica de oscilação do alto-falante é transformada em calor pela resistência mecânica.

$Sd$  = área efetiva do diafragma ( $\text{m}^2$ ): corresponde a área projetada do diafragma, como se ele fosse um pistão.

$BL$  = fator de força (T.m= *Tesla* vezes metro) é calculado pela curva de impedância. Corresponde a densidade do fluxo magnético (B) no entreferro vezes o comprimento de fio que compõe a bobina. Também é um parâmetro dinâmico.

$Re$  = resistência elétrica ( $\Omega$ : *Ohms*) da bobina, é medida com um ohmímetro.

Conforme Silva (1996) os parâmetros Thielle-Small e suas unidades são:

$Fs$  = frequência de ressonância (Hz= *Hertz*): é inversamente proporcional a raiz quadrada do produto entre a massa do conjunto móvel e a compliância da suspensão. Assim, quanto mais pesado o cone e/ou macia a suspensão, mais baixa será a frequência de ressonância.

$$Fs = \frac{1}{2\pi\sqrt{Mms \times Cms}} = \frac{\omega s}{2\pi} \quad (21)$$

$Vas$  = volume acústico equivalente ( $\text{m}^3$ ): representa o volume de ar com uma compliância

(deslocamento / força) idêntica a da suspensão.

$Q_{es}$  = fator de qualidade elétrico, é diretamente proporcional à raiz quadrada do quociente entre a massa móvel e a compliância mecânica e inversamente proporcional ao quadrado do fator de força  $BL$ , dividido por  $R_e$ . Quanto menor o valor do  $Q_{es}$ , maior a eficiência do alto-falante.

$$Q_{es} = \frac{\sqrt{M_{ms}/C_{ms}} \times R_e}{BL^2} \quad (22)$$

$Q_{ms}$  = fator de qualidade mecânico: representa o quociente entre a energia armazenada na compliância (ou na massa móvel) e a energia dissipada na resistência mecânica da suspensão.

$$Q_{ms} = \frac{\sqrt{M_{ms}/C_{ms}}}{R_{ms}} \quad (23)$$

$Q_{TS}$  = fator de qualidade total do alto-falante: resultante dos valores de  $Q_{es}$  e  $Q_{ms}$  segundo a relação:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \times Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} = \frac{\sqrt{M_{ms}/C_{ms}}}{R_{ms} + BL^2/R_e} \quad (24)$$

$\eta_0$  = eficiência: indica a eficiência (potência acústica / potencia elétrica) a ser obtida na banda passante (região de resposta plana) em qualquer tipo de radiador direto (caixa fechada, refletor de graves, radiador passivo).

$X_{máx}$  = deslocamento máximo (linear) que pode ser submetido o conjunto móvel, dentro dos limites aceitáveis de distorção (que cresce acentuadamente quando ultrapassado) ficando ao alto-falante sujeito a danos mecânicos.

Segundo Dickason (1995), para adequar um alto-falante a uma caixa, devemos controlar as características de resposta resultantes. A maneira mais prática é medir e alinhar o fator de qualidade total de caixa fechada  $Q_{tc}$ . Este fator é um indicador da amplitude do pico de

resposta, mostrando-nos como as características eletro-mecano-acústicas do alto-falante interagem entre si. Valores elevados de  $Q_{tc}$ , nas vizinhanças de 1, produzem um som “quente”, robusto, que os profissionais do mercado denominam “graves que vendem”. Valores mais baixos de  $Q_{tc}$ , em torno de 0,8, soam menos profundamente (em parte devido a melhor resposta transitória). Um  $Q_{tc}$  igual a 0,5 é encarado como excessivamente austero e super amortecido.

### 2.7.1 Compliância

A compliância dos anéis de centragem é muito importante pois afeta a frequência de ressonância fundamental do alto-falante. Como os anéis de centragem têm a dupla função de centrar a bobina e prover a força restauradora de movimento do cone, esta força restauradora pode ser medida como níveis de compliância. Isto determina a importância do anel de centragem com a responsabilidade de controlar o movimento do alto-falante.

A compliância, segundo Hernandez (2001) é um dos parâmetros mais importantes do alto-falante. Em conjunto com a massa do sistema móvel (incluindo o ar) ela determina a frequência de ressonância. Esta massa oscila num movimento de oscilação modelada pela Lei de Hooke, como um oscilador amortecido e forçado, consistindo em uma massa  $m$  que oscila por estar ligada em uma mola que se aplica uma força restauradora.

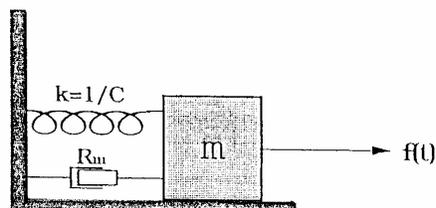


Figura 12 - Efeito-mola da Lei de Hooke  
Fonte:Hernandes (2001)

Ela diz que o deslocamento  $x$  da massa será proporcional a força restauradora.  $K$  é a constante da mola, assim chamada por estar relacionada com as propriedades da mesma. O inverso de  $K$  ( $1/K$ ) é a compliância ( $C$ ).

$$F = - K \cdot x \quad (26)$$

Onde:  $F$  = força

$K$  = constante da mola

$x$  = deslocamento da mola

Nos alto-falantes, existem forças dissipativas que se opõem (tendem a frear) ao movimento fazendo com que o deslocamento da massa vá diminuindo com o tempo se não houver uma força motriz aplicada. Para que o movimento não cesse, uma força externa  $f(t)$  deve ser aplicada ao oscilador. Portanto, o oscilador, nessas condições, deixará de ser um oscilador harmônico simples para tornar-se um oscilador harmônico amortecido e forçado.

Na grande maioria dos casos (principalmente quando a suspensão é fabricada com espuma) a compliância da borda tem pouca influência na frequência de ressonância, portanto é de fundamental interesse o estudo do anel de centragem.

Borwick (1994), utilizando um análogo elétrico, define que a compliância é equivalente à capacitância (quando comparada a um circuito elétrico), e ela tem a capacidade de armazenar energia gasta no processo de deflexão. Quando a força é removida, a energia armazenada é removida de maneira similar à descarga de um capacitor.

Olson (1962) cita que energia potencial retilínea mecânica é associada à compressão de uma mola. A energia mecânica aumenta se a mola é comprimida, e diminui se ela é permitida se expandir. A compliância é o elemento mecânico que se opõe à mudança na força aplicada.

Segundo True (1993), ao descrever um sistema de medição de compliância, torna-se necessário a definição de rigidez: é a medida da resistência à deflexão mecânica, definida como a razão entre a força versus curva de deflexões, nas unidades SI em Newtons / metros. A rigidez pode mudar com o aumento da deflexão. A compliância é definida como sendo o inverso da rigidez.

A rigidez é definida por Horath (1995) como uma medida da habilidade de resistir a uma deformação quando recebe uma carga. É determinada pela razão entre o *stress* (intensidade das forças internas distribuídas ou forças componentes que resistem a mudança de forma de um corpo: pode ser de tensão, de compressão ou de cisalhamento) pela deformação ( mudança por unidade de comprimento das dimensões lineares de um corpo que sofreu stress ) e esta razão é denominada de Módulo de Young.

$$E = \sigma / \xi \quad (27)$$

Onde: E = modulo de elasticidade

$\sigma$  = stress

$\xi$  = deformação

O Modulo de Elasticidade representa a rigidez do material, e pode ser de três tipos: Módulo de Tensão, de Compressão ou Cisalhamento, dependendo da força correspondente.

Segundo Horath (1995) e Hernandes (2001), os materiais podem sofrer o fenômeno de perda de energia (histerese) devido as deformações elásticas ou inelásticas dos materiais.

### **2.7.2 Sistema de medição de compliância**

Para medir-se a compliância de uma centragem, adota-se um dos dois sistemas descritos pela norma RS-438 da *ALMA* (*American Loudspeakers Manufacturers Association, 1987*) : No

primeiro, a compliância é definida pelo deslocamento sofrido pela centragem quando a mesma é submetida a uma força conhecida, através de uma massa pendurada no centro do anel de centragem.

Em outra forma de medição, provoca-se um deslocamento e mede-se a força de reação controlando-se o deslocamento com sensores conectados a um computador, minimizando o erro humano. O método empregado na empresa é a colocação de um peso no sentido axial da centragem e medição do deslocamento através de um sensor de deslocamento. A compliância medida é pontual, apesar de sabermos que a característica é não-linear.

O método indicado pela *ALMA* faz uma medição ponto a ponto da compliância, possibilitando-se uma medição das não-linearidades para um deslocamento razoável.

### 3 PLANEJAMENTO DO ESTUDO

O modelo proposto neste trabalho desdobra-se nas seis etapas principais (modelo representado no gráfico da Figura 19):

(i) análise do cenário atual: apresenta-se o problema, ou seja, quais os indicadores que estão fora de controle e que merecem estudos e melhorias. Apresenta-se os relatórios e extraem-se os dados nos relatórios de acompanhamento de especificações do cliente;

(ii) definição das características da qualidade e dos parâmetros de resposta. As características de qualidade (CQs) são a voz do cliente, e através de pesquisa de mercado tipo questionário aberto busca-se o maior número possível de informações sobre as características de produto que os clientes consideram importantes. Os parâmetros de resposta (PRs) são a voz dos especialistas, e através de reuniões com as pessoas envolvidas no processo buscam-se quais os parâmetros de resposta que permitem quantificar as características da qualidade.

(iii) planejamento do projeto de experimentos: a equipe identifica os parâmetros de processo (PPs), que são os parâmetros do processo de produção que influenciam os parâmetros de resposta. Os parâmetros de processo se subdividem em fatores controláveis (FCs), aqueles que podem ser estudados a vários níveis no experimento; em fatores mantidos constantes, os que não são alterados no experimento; e nos fatores não-controláveis, também ditos fatores de ruído. Elabora-se a matriz experimental e as condições do experimento.

(iv) realiza-se a execução do projeto de experimentos, conhecendo-se e otimizando-se os fatores de processo.

(v) realiza-se a Modelagem do processo através da regressão Múltipla, objetivando modelar a variável de resposta em função dos parâmetros controláveis.

(vi) elaboração de plano de ação para melhorias de processo: faz-se partindo das conclusões do experimento e visando-se melhorar a situação atual na empresa;

(vii) apresentação dos resultados: evidencia-se o efeito das melhorias e avalia-se a validade do trabalho no intuito de melhorar o processo na empresa em questão.

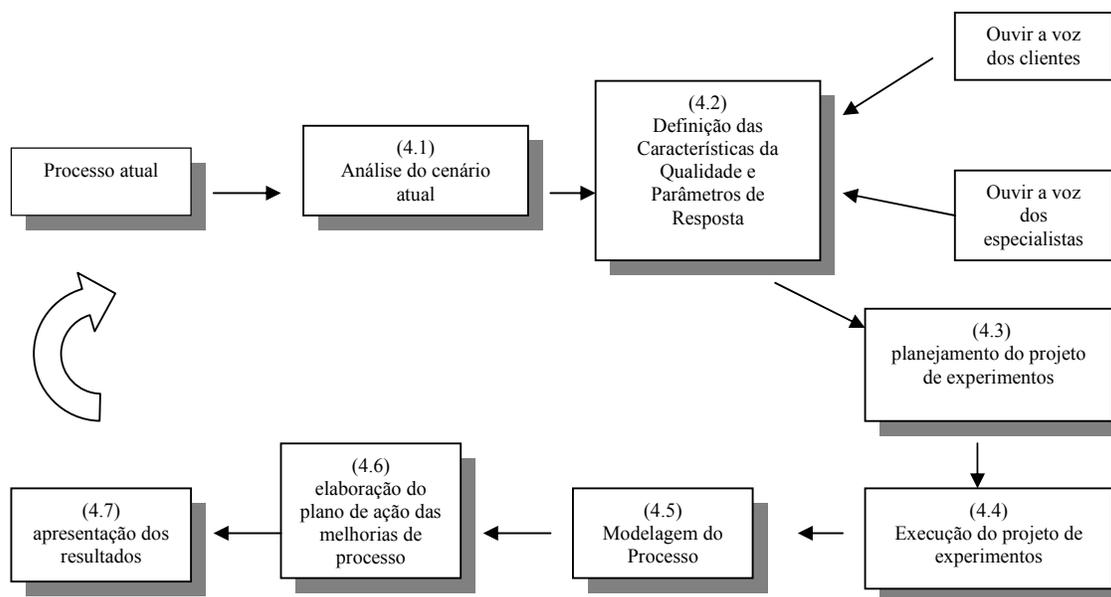


Figura 13 - Planejamento do Estudo

Na Figura 14, representa-se esquematicamente o planejamento do estudo, mostrando as etapas e suas correlações.

### 3.1 Análise da situação atual

Nesta etapa apresenta-se o problema, ou seja, quais os indicadores que estão fora de controle e que merecem estudos e melhorias. Extraem-se os dados nos relatórios de acompanhamento de especificações do cliente, sejam eles externos (compradores do produto) ou internos (manufatura do produto).

### 3.2 Definição das características da qualidade

Para realizar a identificação das características de qualidade, torna-se necessário consultar os clientes e os especialistas para melhor relacionar a demanda de qualidade esperada pelo cliente e os parâmetros de resposta do processo, através de reunião com especialistas e

estudos de *QFD* (Desdobramento da Função Qualidade). Um modelo desta relação está representado na Figura 15.

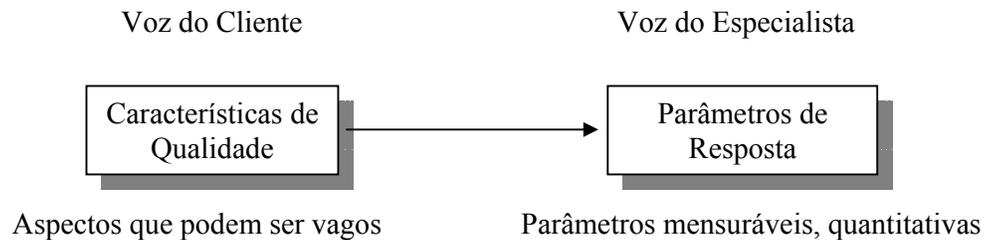


Figura 14 - Relação entre demanda de qualidade (cliente) e os parâmetros de resposta (especialista)  
 Fonte: Ribeiro e Caten,(2000c)

A voz do cliente é extraída de uma pesquisa de mercado realizada pela empresa, que inclui um questionário aberto buscando as características de qualidade demandada.

### 3.3 Planejamento do projeto de experimentos

Para o planejamento do experimento é necessário que a equipe técnica identifique os Parâmetros de Processo (PPs) com maior probabilidade de influenciar a qualidade dos produtos fabricados.

Avalia-se também entre os PPs quais aqueles que serão alterados durante o experimento, os Fatores Controláveis do experimento, e os que serão mantidos constantes, os Fatores Secundários.

Para a identificação dos FCs utiliza-se a matriz causa e efeito (semelhante às matrizes de *QFD*), de maneira a simplificar o entendimento do problema e das causas de origem. O esquema desta matriz está representado no capítulo 2.4.

### **3.4 Execução do projeto de experimentos**

De posse dos dados coletados, montou-se a matriz experimental, e fez-se uma análise das interações significativas através da técnica de análise de variâncias *ANOVA* (*Analysis of Variance*) e obteve-se os gráficos das interações significativas.

Para o experimento, foi preparado o local e as condições de processo idênticas às da produção normal (mesmos equipamentos, com mesmas ferramentas, com medidores calibrados, realizados com mesmo operador treinado, realizados no mesmo dia).

### **3.5 Modelagem do processo**

Realiza-se aqui também um estudo de regressão múltipla, transformando os dados colhidos numa equação, com o objetivo de testar a validade do experimento e utilizá-lo para uma análise de otimização. Em função da variabilidade da compliância no processo, justifica-se um estudo visando modelar a variância da compliância, visando a sua minimização.

Analisa-se também os resíduos, com um gráfico de resíduos contra o tempo (ordem da coleta das observações). Se neste gráfico os resíduos estiverem em ordem aleatória ao torno do eixo horizontal, então será obtida uma indicação de validade da suposição de independência dos erros aleatórios (Werkema, 1996b).

Estipula-se também o ajuste ótimo do processo, de posse da equação de regressão e interpolando-se os níveis, encontrando os valores de resposta mais perto da nominal.

### **3.6 Análise dos resultados**

A análise dos resultados: faz-se através da análise da variância, verificando os efeitos principais significativos no experimento. Par tanto,utilizou-se dos gráficos extraídos da

*Anova*. Obtém-se então quais os parâmetros importantes do processo, que devem ser melhorados e controlados.

### **3.7 Confirmação das melhorias**

Estipulou-se um plano de ação para, na prática e no ambiente da empresa, certificar-se acerca das melhorias propostas pelo estudo. Para isto, é necessário a participação de toda a equipe, principalmente dos operadores envolvidos no processo.

#### 4 ESTUDO DE CASO

Neste trabalho, será analisado o processo de produção de centragens de alto-falantes avaliando estatisticamente os processos atuais na empresa, visando a melhoria do processo de fabricação, utilizando para tal a ferramenta estatística de Projeto de Experimentos. O processo de fabricação dos anéis de centragem conta com os passos apresentados na Figura 15.

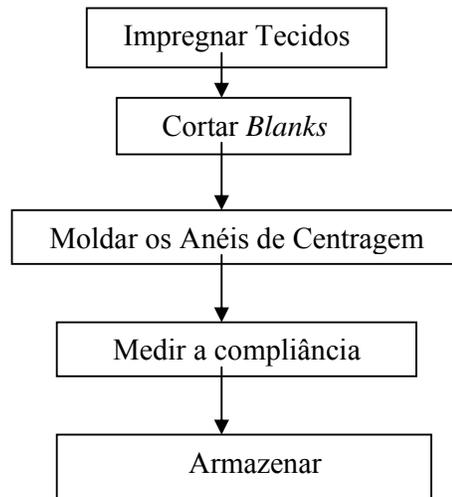


Figura 15 - Esquema do processo de fabricação dos Anéis de Centragem de Alto-falantes

As centragens dos alto-falantes são peças moldadas, fabricadas a partir de tecidos impregnados com resina fenólica termomoldável em uma calandra, e posteriormente moldados no formato circular com superfície ondulada, conforme a Figura 16, no intuito de fornecer sustentação ao conjunto móvel do alto-falante, como uma mola, que produz a

resposta (som).

Avalia-se a qualidade da centragem quantitativamente pelo fator de compliância (relação entre deslocamento e força da peça). A tolerância de variabilidade aceita pelos especialistas é de quinze por cento.



Figura 16 - Moldagem de um anel de centragem

Para a liberação do lote, o operador deve moldar as cinco primeiras peças, aguardar curar quinze minutos, e então medir no compliâncímetro o valor da compliância, anotando na carta de controle. Num tempo pré-determinado, ele deve repetir a operação para que as peças não saiam dos limites de controle.

Os parâmetros de processo controlados são: (i) a temperatura de moldagem, através de um termômetro instalado na ferramenta de moldar e contando com um controlador automático de temperatura; (ii) um *timer* que controla o tempo de moldagem, (iii) e gramatura do tecido impregnado não é medida, e sim controlada com a receita da diluição da resina no banho de impregnação dos tecidos.

#### 4.1 Análise da situação atual

O problema verificado que motivou a realização deste trabalho é a presença de lotes de alto-falantes fabricados fora de especificação.

Durante a inspeção final dos alto-falantes de 12 polegadas, ao medir-se os fatores: *QTS*, Resistência Elétrica da bobina e a Frequência de Ressonância, verifica-se que na fabricação dos lotes, alguns apresentam-se fora do especificado (especificamente o *QTS*- fator de qualidade total), produzindo refugos e retrabalhos.

Verifica-se na Figura a seguir, representando uma carta de controle de medidas de compliância de anéis de centragem dos alto-falantes de 12 polegadas, aonde verifica-se a ocorrência de causas especiais, isto é, pontos fora dos limites de controle:

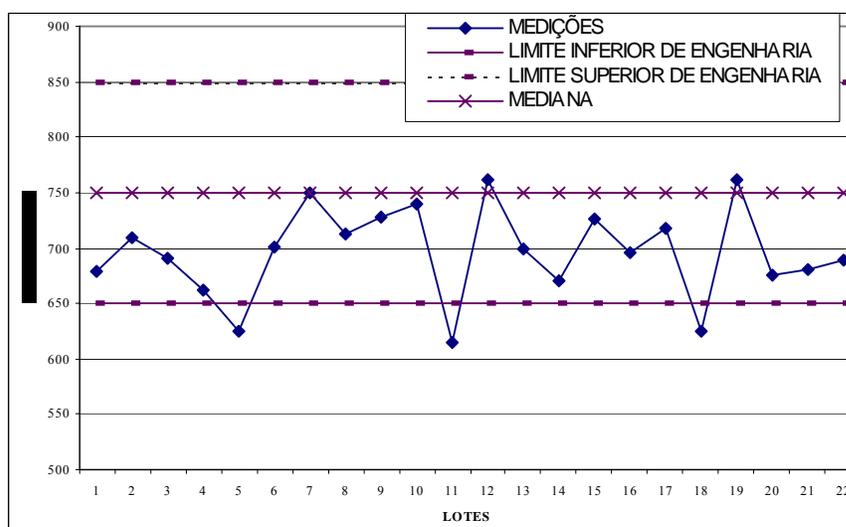


Figura 17 – Anel de Centragem 200813 – acompanhamento de especificação do cliente (compliância) mostrando os limites de engenharia (em tracejado) e a situação dos lotes

## 4.2 Definição das características da qualidade

Nesta etapa são estabelecidos, pela equipe de trabalho, os objetivos do estudo e definidas as metas para sua verificação. Identifica-se as características da qualidade de interesse de mercado e define-se os parâmetros de resposta (PR) diretamente relacionadas a elas.

Para a realização deste trabalho é formada uma equipe multifuncional com familiaridade no produto e seu processo de fabricação.

#### 4.2.1 Ouvir a voz do cliente (o quê)

Um determinado cliente, ao comprar um alto-falante, necessita projetar uma caixa acústica, de acordo com as especificações do alto-falante, para compor o seu sistema de som. Para tanto, os produtos devem sair de fábrica com as especificações técnicas dentro do especificado, para não ocasionarem insatisfações para os clientes.

Para fazer o estudo de QFD, a empresa realizou uma pesquisa de mercado, focalizada em clientes para alto-falantes profissionais de 12 polegadas. Os dados, levantados de uma pesquisa de mercado tipo questionário aberto, foram listados na tabela 3 como características da qualidade do produto.

Levando-se em consideração as características de qualidade funcionais dos alto-falantes (e deixando de lado neste estudo parâmetros como visual, *design* e preço) os clientes adotam como características de qualidade os itens relacionados, que foram analisados e priorizados na Matriz das Características das Partes no *QFD* (apresentada no anexo 2), correlacionando a qualidade exigida pelo cliente com as funções do produto, apresentando como resultado o gráfico da figura 20.

Tabela 3 – Demanda de Qualidade do Cliente

<b>Cone mais Rígido</b>
Produto sem Vibrações estranhas
Não Descolar os Componentes
Não Quebrar a Cordoalha
Alto-Falante com bom Rendimento
Baixa Distorção Harmônica
Sem Ressonâncias
Alta Potência ( mínimo 600 W)
Maior deslocamento Linear do Conjunto Móvel
Produto com Menor Altura
<i>QTS</i> na nominal

Fazendo-se uma análise dos três primeiros itens, observa-se que a compliância ficou em primeiro lugar, com 15% do peso relativo. Os outros itens são carcaça reforçada, função que é dependente de projeto, e massa do cone, que foi considerada neste est

Verifica-se aqui a importância da compliância tanto no projeto do produto quanto à qualidade exigida pelos clientes.

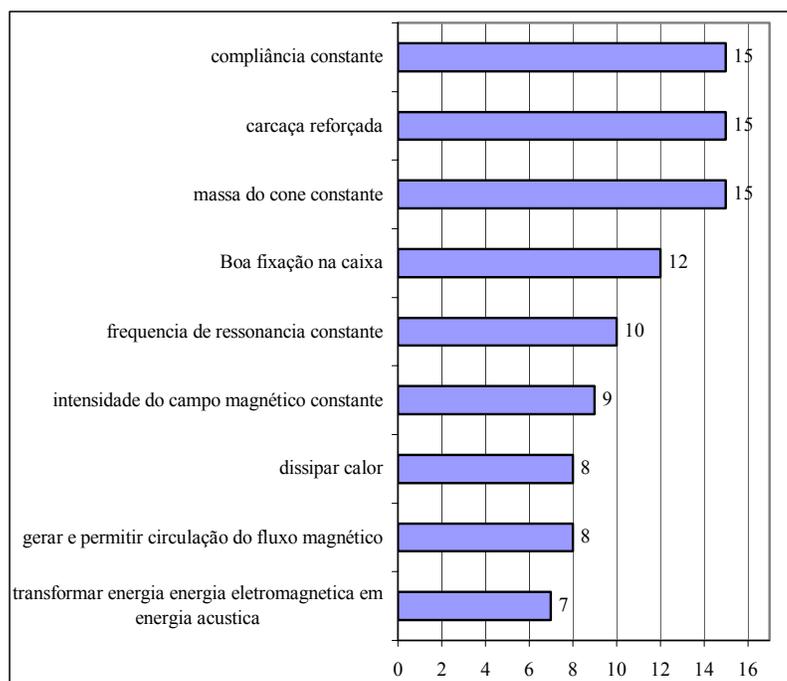


Figura 18 - Estudo *QFD*: resultado da análise da Matriz das Características das Partes

#### 4.2.2 Ouvir a voz do especialista (como)

Para traduzir-se as características de qualidade dos alto-falantes exigidas pelos clientes os engenheiros as traduzem em parâmetros de resposta mensuráveis, mostrados na tabela 5.

Tabela 4 – Parâmetros de Resposta do Processo

<i>T</i>	Intensidade da magnetização
<i>T/m<sup>2</sup></i>	Capacidade de magnetização do ímã
<i>mm</i>	Espessura do fio de cobre
<i>voltas</i>	Número de voltas da bobina
<i>g/l</i>	Concentração do banho de celulose
<i>bar</i>	Pressão de moldagem do cone de celulose
<i>g/m<sup>2</sup></i>	Gramatura do tecido impregnado
<i>°C</i>	Temperatura de moldagem do anel de centragem
<i>seg</i>	Tempo de moldagem do anel de centragem

Lista-se também os principais fatores de ruído, que podem interferir nos resultados dos estudos:

Tabela 5 - Lista dos Fatores de Ruído e como controlá-los

Impregnação irregular do tecido (gramatura não-constante, presença de umidade no tecido, variação da pressão nos rolos de impregnar)	1-) Controle de qualidade da matéria-prima ( gramatura e umidade) 2-) Armazenagem em local seco 3-) Medir e Controlar a Pressão dos Rolos
Variação nas condições de polimerização do polímero (tempo e temperatura de moldar, tempo e temperatura de secar o tecido, umidade relativa do ar)	1-) controle de qualidade no recebimento do polímero (tempo de cura) 2-) Armazenagem em local seco
Variação na qualidade do tecido (gramatura, espessura, trama e urdume, tipo de fio)	1-) controle da qualidade no recebimento da matéria-prima ( trama e urdume, espessura, gramatura)
Erros de medição (compliancemetro, balança de gramatura, operador)	1-) estudos de R&R e MSA; 2-)calibração periódica dos instrumentos.

#### 4.2.3 Identificação dos parâmetros secundários

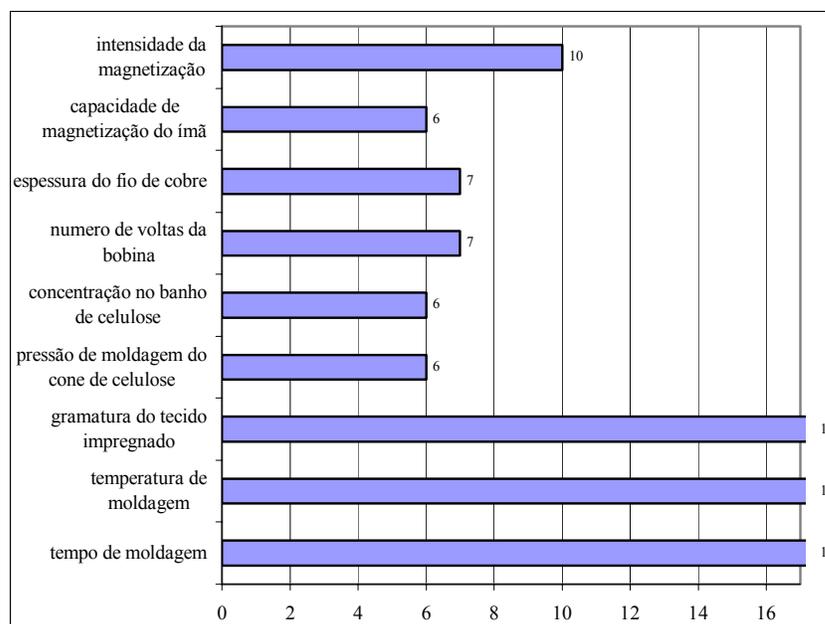
De acordo com os especialistas, os parâmetros de processo que podem ser controlados e não possuem efeito significativo sobre a resposta (ou cujo efeito já é conhecido), são mantidos constantes durante o experimento, e estão listados na tabela 9.

Tabela 6 - Lista dos Parâmetros Secundárias

resistência elétrica da bobina
massa do conjunto móvel (cone, bobina, suspensão e
resistência mecânica da suspensão

Levando-se em consideração as opiniões dos especialistas, e tomando-se os parâmetros principais, estes foram analisados e priorizados na Matriz dos Parâmetros de Processos no *QFD* (apresentada no anexo 3), correlacionando a qualidade exigida pelo cliente com os parâmetros de processo, apresentando como resultado o gráfico da figura 21.

Fazendo-se uma análise dos três primeiros itens, observa-se que os itens gramatura do tecido impregnado, tempo e temperatura de moldagem do anel de centragem têm importância principal e justificam um estudo aprofundado para melhorar o processo.

Figura 19 - Estudo *QFD*: resultado da análise da Matriz dos Parâmetros de Processos

### 4.3 Planejamento do projeto de experimentos

Para efeito de priorização, no intuito de relacionar as parâmetros de resposta fixadas com os parâmetros de processo escolhidos pelos especialistas para este experimento, foi estipulada uma escala. A priorização dos parâmetros ficou então assim representada pela tabela 7.

Tabela 7 - Priorização dos parâmetros de resposta do processo

Parâmetros de Resposta	Priorização	Níveis reais	Níveis codificados	
Gramatura do tecido impregnado	294	240 –280 g/m <sup>2</sup>	Baixa-Média-Alta	(-1), 0 e (+1)
Temperatura de Moldagem	270	250-280°C	Baixa-Alta	(-1) e (+1)
Tempo de Moldagem	117	10-15 seg	Baixo-Alto	(-1) e (+1)

No experimento, utilizou-se os parâmetros de processos com maior probabilidade de influenciar a compliância dos produtos fabricados, identificados pelos especialistas no estudo de QFD. Para isto, montou-se então a matriz experimental, representada pela tabela 8.

Tabela 8 - Matriz experimental

	Temperatura de Moldagem Baixa		Temperatura de Moldagem Alta	
	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto
<b>Gramatura de Resina Baixa</b>	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto
<b>Gramatura de Resina Média</b>	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto
<b>Gramatura de Resina Alta</b>	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto	Tempo de Moldagem Baixo	Tempo de Moldagem Alto

Estuda-se a gramatura do tecido impregnado de resina (gramatura baixa, média, alta) porque ocorre uma variação natural da gramatura de resina impregnada no tecido, no processo atual. Nossa meta é alcançar o mais próximo possível da nominal, sendo definido pela engenharia os limites como sendo: mínimo 601, nominal 796 e máxima 991.

#### 4.4 Execução do projeto de experimentos

Para coletar-se amostras, coletou-se um lote inteiro de tecido impregnado, cortou-se o rolo de tecido em *blanks* quadrados de 25x25 cm, e mediu-se o peso de todos os *blanks*. Então separou-se o lote em 3 faixas: gramatura alta, gramatura média, gramatura baixa, visando estudar-se a influência desta variabilidade na compliância final do anel de centragem.

Estuda-se a temperatura de moldagem do anel de centragem (temperatura baixa, alta) pelo fato dela ser importante no processo de cura da resina, e de que normalmente no processo ocorrem variações naturais referentes à manutenção das resistências da ferramenta.

Quanto ao tempo de moldagem do anel de centragem (tempo baixo, tempo alto), decidiu-se estudar este parâmetro devido ao fato de que o tempo de moldagem é importante para a cura da resina, assim como um tempo mínimo é requerido para aumentar a produtividade, havendo necessidade de otimizar o tempo. Realizou-se então um estudo comparando os tempos: baixo (o mínimo, especificado pela engenharia) comparado com alto (um tempo 100% maior visando permitir uma cura completa da resina) e sua influência na compliância dos lotes produzidos.

Realizando-se os experimentos acima, teremos um número de  $3 \times 2 \times 2 \times 3 = 36$  experimentos (3 níveis de gramatura, 2 níveis de tempo de moldar, 2 níveis de temperatura de moldagem, com 3 experimentos cada).

De posse dos dados coletados, montou-se a matriz experimental, e fez-se uma análise das interações significativas através da técnica de análise de variâncias *ANOVA (Analysis of Variance)* e obteve-se os gráficos das interações significativas.

#### 4.5 Modelagem do processo

Realizou-se então o estudo de modelagem do processo, levando em consideração os parâmetros de processo em estudo (A, B e C e suas interações, principalmente a AC que foi considerada significativa pelo estudo da ANOVA). Na tabela 9, demonstra-se que os parâmetros e interações com melhor ajuste (com maior  $R^2$ ) foi utilizando contendo os parâmetros, A (gramatura), B (temperatura), o fator A quadrático (gramatura) e com as interações BxC (temperatura e tempo de moldagem) e AxBxC (gramatura, temperatura e tempo de moldagem).

Montando-se uma matriz com os fatores controláveis gramatura, temperatura e tempo codificados, monta-se uma tabela (apresentada no Anexo 1) então realiza-se uma regressão linear múltipla, conforme demonstrado no capítulo 2.3.

Tabela 9 - Representação dos parâmetros e das interações testadas o  $R^2$  resultante

		$R^2$
A,A <sup>2</sup> ,B,BC,ABC	gramatura, gramatura ao quadrado, temperatura, interação temperatura <i>versus</i> tempo, interação gramatura <i>versus</i> tempo <i>versus</i> temperatura	0,693
A, B,BC,ABC	gramatura, temperatura, interação temperatura <i>versus</i> tempo, interação gramatura <i>versus</i> tempo <i>versus</i> temperatura	0,65
A,A <sup>2</sup> ,B,AC,ABC	gramatura, gramatura ao quadrado, temperatura, interação gramatura <i>versus</i> tempo, interação gramatura <i>versus</i> tempo <i>versus</i> temperatura	0,608
A,B,C,AB,AC,BC,ABC	gramatura, temperatura, tempo, interação gramatura <i>versus</i> temperatura, interação gramatura <i>versus</i> tempo, interação temperatura <i>versus</i> tempo, interação gramatura <i>versus</i> tempo <i>versus</i> temperatura	0,572
A <sup>2</sup> ,B	gramatura ao quadrado, temperatura	0,539
A,A <sup>2</sup> ,B,AC	gramatura, gramatura ao quadrado, temperatura, interação gramatura <i>versus</i> tempo	0,533
A <sup>2</sup> , B,AC	gramatura ao quadrado, temperatura, interação gramatura <i>versus</i> tempo	0,532
A, B,AC	gramatura, temperatura, interação gramatura <i>versus</i> tempo	0,500
A,B,B <sup>2</sup>	gramatura, temperatura, temperatura ao quadrado	0,477
A,B,AC <sup>2</sup>	gramatura, temperatura, interação gramatura <i>versus</i> tempo ao quadrado	0,477

A análise da regressão linear múltipla ficou assim representada:

Tabela 10 - Análise da Regressão Linear Múltipla para a PR compliância

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	727,42	4,03	180,47	0,00
A	6,08	2,85	2,13	0,04
A <sup>2</sup>	-10,08	4,94	-2,04	0,05
B	-16,08	2,33	-6,91	0,00
BxC	5,42	2,85	1,90	0,07
AxBxC	-7,83	2,85	-2,75	0,01

O modelo obtido pela regressão múltipla ficou assim representado:

$$Y_{\text{compliância}} = 727,42 + 6,08A - 10,08A^2 - 16,08B + 5,42BC - 7,83ABC \quad (29)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo na equação foi  $R^2 = 69,28\%$ . Na análise da regressão linear múltipla para a PR compliância, foram identificados como significativos os efeitos (efeitos com  $P < 0,10$ ): *gramatura*, *gramatura ao quadrado*, e as interações *temperatura x tempo* e *gramatura x temperatura x tempo*.

Tabela 11 - Estatística de Regressão

R múltiplo	0,83
R-Quadrado	0,69
R-quadrado ajustado	0,64
Erro padrão	13,96
Observações	36,00

A representação gráfica dos valores de compliância obtidos pela equação comparados com os valores reais está na Figura 22.

Analisando-se também os resíduos, com um gráfico de resíduos contra o tempo (Figura 23) observa-se que neste gráfico os resíduos estão em ordem aleatória em torno do eixo horizontal, obtendo-se uma indicação de validade da suposição de independência dos erros aleatórios.

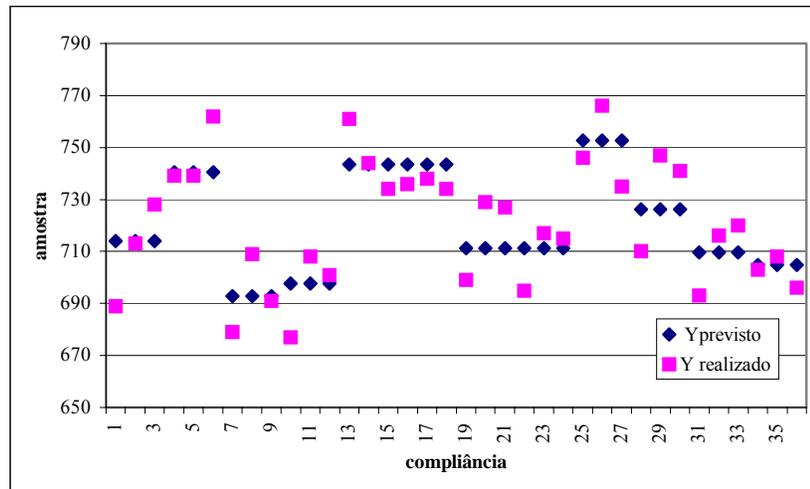


Figura 20 - Gráfico comparativo entre Y x Yprevisto

Analisando-se também os gráficos dos resíduos contra níveis dos fatores (Figura 24), observa-se que neste gráfico que as faixas de dispersão dos resíduos para os dois níveis são aproximadamente iguais, indicando que a dispersão não depende dos níveis, tem erro com média zero e variância constante, o que também valida o modelo.

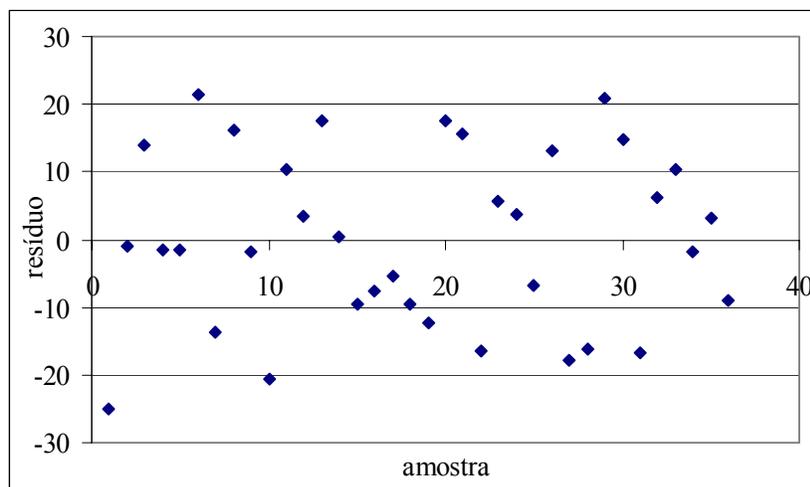


Figura 21 - gráfico de dispersão dos resíduos

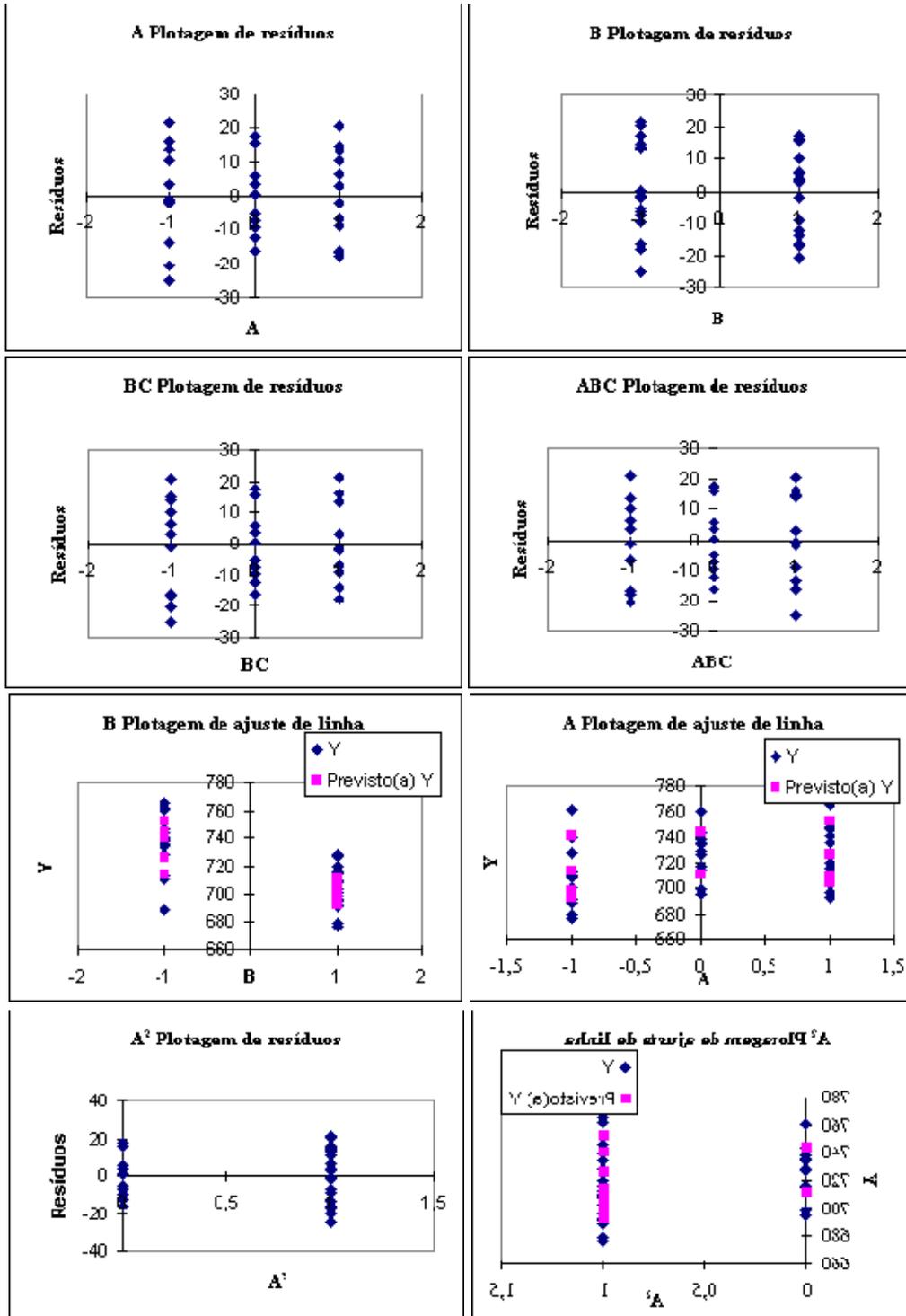


Figura 22 - gráficos de resíduos para análise de validade dos modelos

Fazendo-se uma tabela com os efeitos escolhidos, como demonstrado na tabela 12, observa-se para este experimento como ajuste ótimo quando a gramatura for 0 (média),

temperatura for -1 (baixa), e tempo de moldagem 1(alto). Este ajuste ótimo de fabricação foi estipulado para o caso de querer-se compliâncias o mais próximo da nominal.

Tabela 12 - Cálculo do ajuste ótimo do processo

A	A <sup>2</sup>	B	BC	C	ABC	Y <sub>calc</sub>	meta (nominal)	erro %
<b>1</b>	1	<b>-1</b>	-1	<b>1</b>	-1	741,91	796	<b>6,7952</b>
-1	1	-1	1	-1	-1	740,59	796	6,961055
0	1	-1	1	-1	0	738,84	796	7,180905
1	1	-1	1	-1	1	737,09	796	7,400754
0	1	-1	-1	1	0	728	796	8,542714
-1	1	-1	-1	1	1	714,09	796	10,2902
1	1	1	-1	-1	-1	709,75	796	10,83543
-1	1	1	1	1	-1	708,43	796	11,00126
0	1	1	1	1	0	706,68	796	11,22111
1	1	1	1	1	1	704,93	796	11,44095
0	1	1	-1	-1	0	695,84	796	12,58291
-1	1	1	-1	-1	1	681,93	796	14,3304

#### 4.6 Análise dos resultados

A coleta de dados dos experimentos (VR compliância) ficou representada pela tabela 13. Incorporando-se estes dados numa planilha de cálculo ANOVA, faz-se uma análise de variância dos grupos através das somas dos quadrados e testa-se as mesmas com os testes F (verificar se os F calculados são maiores que F tabelados), e tem-se o resultado da análise de variância na tabela 14. Verifica-se que s efeitos significativos são:

- a) efeitos principais: temperatura de moldagem e gramatura de tecido impregnado de resina, nesta ordem;
- b) efeito da interação AC (gramatura e Tempo de Moldagem).

Traçando-se os gráficos dos efeitos dos fatores principais, observa-se nos gráficos as correlações dos fatores.

Tabela 13 - Dados Coletados de PR compliância

	Temperatura de Moldagem Baixa		Temperatura de Moldagem Alta	
	Tempo de Moldagem baixo	Tempo de moldagem alto	Tempo de Moldagem baixo	Tempo de moldagem alto
<b>Gramatura de Resina baixa</b>	689	739	679	677
	713	739	709	708
	728	762	691	701
<b>Gramatura de Resina Média</b>	761	736	699	695
	744	738	729	717
	734	734	727	715
<b>Gramatura de Resina Alta</b>	746	710	693	703
	766	747	716	708
	735	741	720	696

Tabela 14 - Tabela ANOVA do Experimento

	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Media dos Quadrados	F calc	F tab	Significância
<b>A: Gramatura</b>	1701,556	2	850,778	3,980	3,400	Sim
<b>B: Temperatura de Moldagem</b>	9312,250	1	9312,250	43,560	4,260	Sim
<b>C: Tempo de Moldagem</b>	4,694	1	4,694	0,022	4,260	Não
<b>AB</b>	98,667	2	49,333	0,231	3,400	Não
<b>AC</b>	1846,222	2	923,111	4,318	3,400	Sim
<b>BC</b>	148,028	1	148,028	0,692	4,260	Não
<b>ABC</b>	797,556	2	398,778	1,865	3,400	Não
<b>Erro</b>	5130,667	24	213,778			
<b>total</b>	19039,639	35				

O objetivo é obter como alvo a compliância na nominal (valor 796), o que justifica conhecer bem os efeitos dos parâmetros para controlar o processo.

Observa-se no gráfico compliância *versus* temperatura (Figura 25) que a temperaturas mais baixas obtêm-se valores de compliância mais perto da nominal. No gráfico compliância *versus* tempo de moldagem, os melhores resultados também são em temperaturas mais baixas (Figura 26).

Nos gráficos *compliance versus* tempo e temperatura de moldagem, o melhor efeito é obtido quando se trabalha com gramaturas médias ou altas (Figura 27). Identifica-se então o ponto ótimo do processo quando molda-se as peças com gramatura média ou alta e temperatura baixa. Como o tempo é indiferente, opta-se por baixo por questões de economia de tempo.

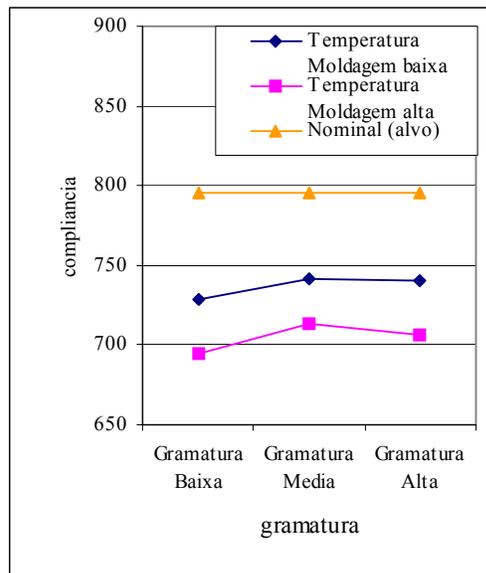


Figura 23 - Gráfico de Fatores: *compliance versus* gramatura em função da temperatura de moldagem

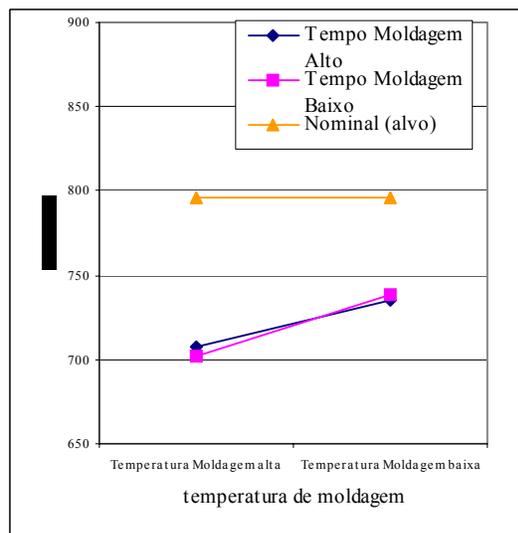


Figura 24 - Gráfico de Fatores: *compliance versus* temperatura de moldagem em função do tempo de moldagem

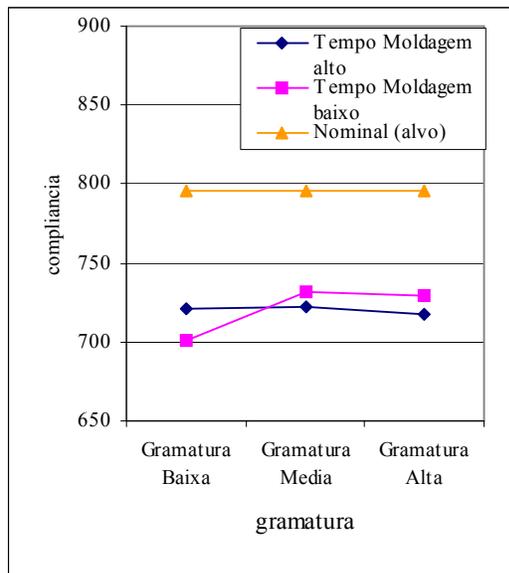


Figura 25 - gráfico de fatores: compliância *versus* gramatura em função do tempo de moldagem

Tem-se evidenciado então o quanto importante é a influência dos parâmetros: **temperatura de moldagem**, observando-se que quanto mais baixa, melhores os valores de compliância (mais perto da nominal), portanto opta-se por temperaturas baixas, e a **gramatura**, tornando-se necessário controlar os parâmetros mecânicos da máquina de impregnar (calandra) que podem influenciar na gramatura do tecido: afastamento dos rolos, secagem da resina, absorção da resina pelo tecido, etc. de maneira a diminuir a variabilidade do processo e ter-se controle do processo. Como fator controlável deste processo, deve-se incluir a gramatura da resina em uma carta de controle de processo, de maneira a garantir que a compliância do lote esteja dentro do especificado pela engenharia.

Tais controles visam garantir a gramatura requerida no processo de impregnação do tecido e assegurar a compliância dos anéis de centragem, objetivando a qualidade do produto final (alto-falante). Quanto ao tempo de moldagem, observa-se que eles não influem relativamente na compliância (a variação ocorre em níveis de 4,5% que é considerada muito pequena), para tanto, torna-se necessário minimizar o tempo para obter-se maior produtividade.

#### 4.7 Confirmação das melhorias

Reunindo-se com a equipe formada pelas pessoas envolvidas neste processo (engenharia de produto, engenharia de processo, facilitador e operador) e baseando-se nos dados obtidos para o ajuste ótimo, montou-se um plano de ação com o objetivo de testar e confirmar as melhorias apresentadas no estudo, em âmbito do processo. Tal plano está representado pela tabela 15, destacando os responsáveis (quem), data (quando), se a ação é corretiva ou preventiva e o *status*.

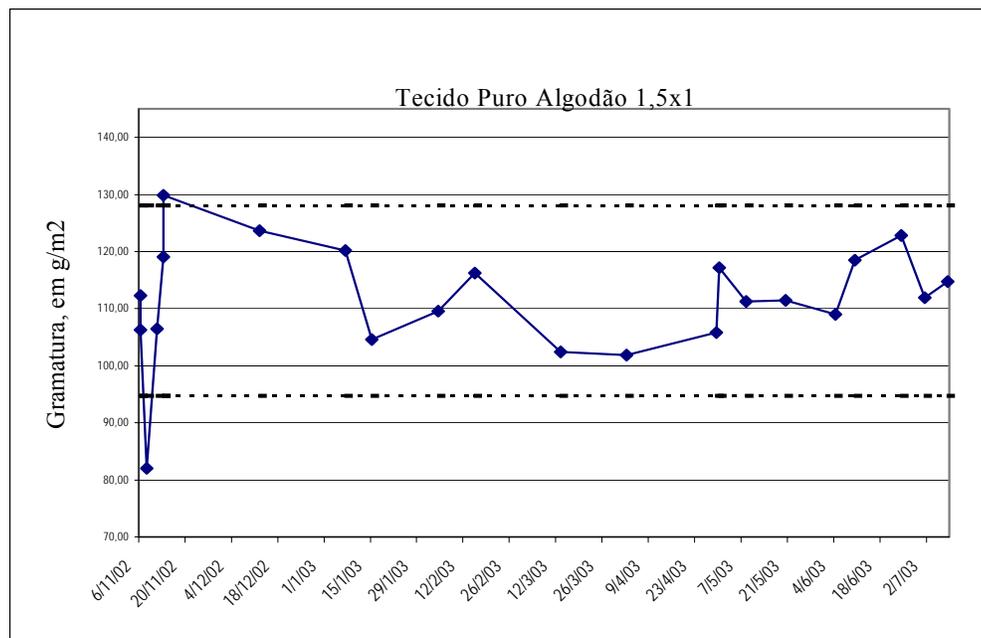


Figura 26 - Acompanhamento de Especificações de Cliente (gramatura) mostrando os limites de engenharia (em tracejado) e a evolução gramatura nos lotes, na escala de tempo

Tabela 15 - Plano de Ação: definição das ações gerais

<b>AÇÕES GERAIS</b>	<b>QUEM</b>	<b>QUANDO</b>	<b>CORR./PREV</b>
Regular parâmetros mecânicos da máquina, (pressão entre rolos, afastamento entre rolos) normatizar e documentar. Objetivo: gramatura na nominal.	Engenharia de Processos	31/10/02	P
Moldar peça no tempo de 10 segundos. Objetivo: tempo de moldagem baixa.	operador	31/11/02	C
Fazer estudo de gramatura do Tecido Impregnado versus compliância;	Engenharia de Processos	31/11/02	P
Definir parâmetros, controles e documentar.	Engenharia de Processos	31/12/02	P

Após a implementação do plano de ação, foram coletados dados que comprovaram a eficiência das melhorias sugeridas. Na Figura 28, implementou-se uma carta de controle monitorando a gramatura do tecido impregnado, com o objetivo de associar-se à gramatura com a compliância do lote em questão, e também fazer estudo visando centralizar-se as medidas. Observa-se nas medições iniciais um processo não-estável, e posteriormente uma melhoria de estabilidade.

Na Figura 27, observa-se um acompanhamento das especificações do cliente (compliância do anel de centragem de alto-falante de 12 polegadas), onde verifica-se um controle eficaz da variabilidade atingindo um nível satisfatório, dentro da faixa esperada. A intersecção da reta vermelha e a seta indicam o momento em que as ações de melhoria foram implementadas. Isto foi conseguido graças as ações de melhoria de processo, listadas no plano de ação da tabela 16.

Observa-se que, em consequência das melhorias, os índices *QTS* dos alto-falantes também melhoraram conforme registrado na Figura. Ao mesmo tempo, observou-se no gráfico de acompanhamento de especificação compliância que no mesmo período a faixa de compliância ficou dentro da faixa, conforme demonstrado na Figura 28.

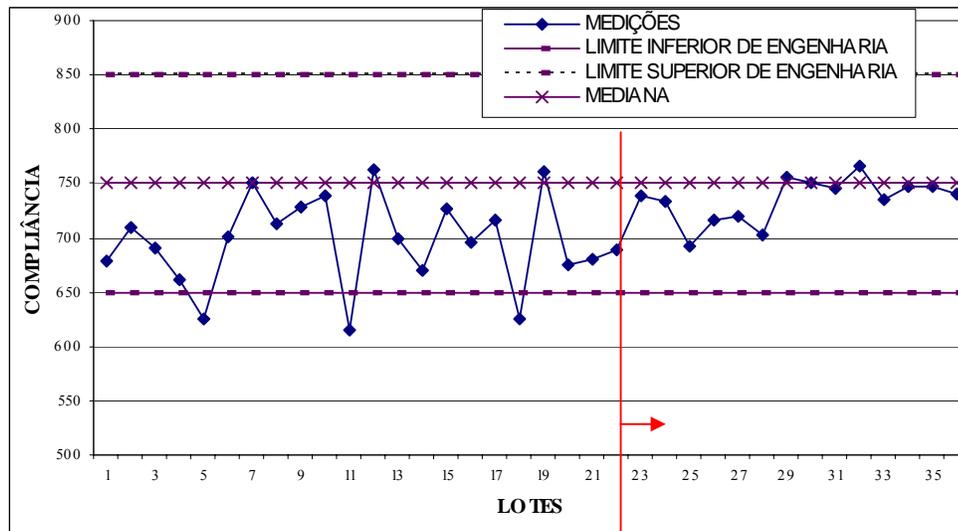
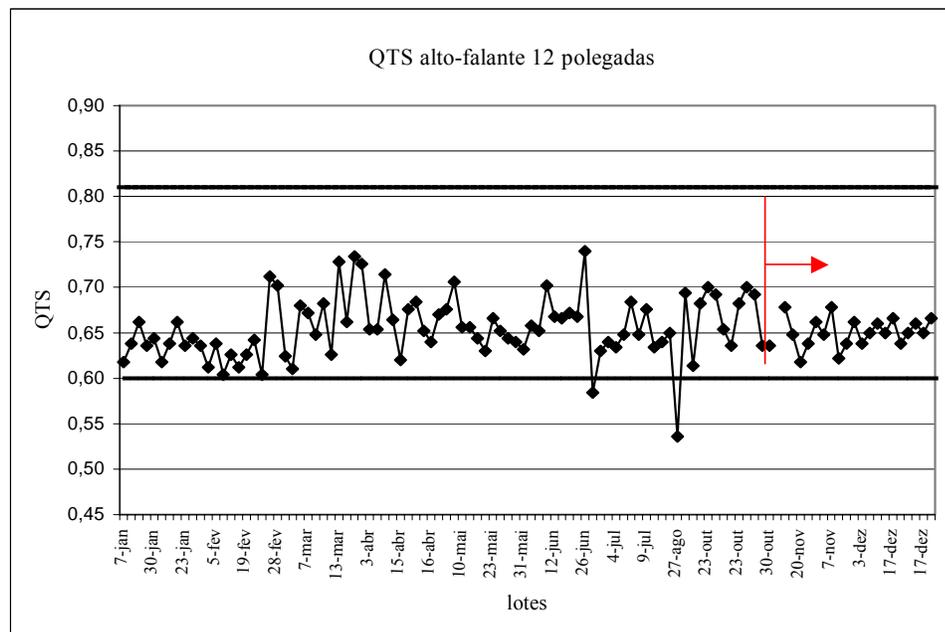


Figura 27 - Acompanhamento de Especificações de Clientes (compliancia) mostrando os limites de engenharia (em tracejado) e os resultados dos lotes na escala de tempo



## **5 COMENTÁRIOS FINAIS**

### **5.1 Conclusões**

No que tange ao objetivo geral do trabalho de propor e implantar um método de análise e otimização de um processo de fabricação de anéis de centragens de alto-falantes, conclui-se que através do Projeto de Experimentos e da modelagem do processo através de Regressão Linear é possível verificar-se os parâmetros de processo que afetam a compliância dos anéis de centragem de auto-falantes, assim como identificar-se fatores críticos no processo para propor eventuais melhorias.

Aplicando-se o projeto de experimentos, verificou-se que os efeitos significativos sobre a compliância são:

- a) efeitos principais: temperatura de moldagem e gramatura de tecido impregnado de resina, nesta ordem;
- b) efeito da interação AC (gramatura e Tempo de Moldagem).

Traçando-se os gráficos dos efeitos dos fatores principais, observa-se nos gráficos as correlações dos fatores e escolhe-se para este experimento como ajuste ótimo temperatura de 250 graus (baixa), tempo de moldagem 10 segundos (baixa) e gramatura de 260 ou 280 graus (média ou alta). Estes pontos ótimos de fabricação foram estipulados para o caso de querer-se compliâncias o mais próximo do alvo, e sempre buscando-se um tempo de fabricação menor,

visando diminuir custos.

O experimento foi aplicado ao processo de fabricação de anéis de centragem da empresa, e permitiu que além do processo, também os envolvidos tivessem benefícios, uma vez que houve uma grande troca de informações e conhecimento entre todos. O Plano de Ação foi traçado e executado, visando alcançar as melhorias do processo, e observou-se posteriormente que as ações atingiram melhorias.

O modelo mostrou-se válido na medida em que foram identificadas e ressaltadas as características importantes sob o ponto de vista do cliente e que o trabalho de melhoria, padronização e monitoramento realizado tenha sido aplicado de forma completa nos processos e parâmetros realmente influentes na construção destas características

Com o estudo de caso, procurou-se aplicar o projeto de experimentos no processo real de manufatura. Através do estudo, a equipe toda pôde aperfeiçoar o conhecimento do processo, identificando quais são os parâmetros que realmente interferem na qualidade do produto, permitindo uma otimização na utilização de tempo e de recursos, através do redirecionamento de sua aplicação.

Isto torna-se importante a medida que cada um, na sua função, deve pelo menos saber claramente quais são as suas responsabilidades e de que forma o seu trabalho afeta as dimensões da qualidade que os clientes consideram mais importantes. Esta compreensão torna-se fundamental no âmbito de um mercado globalizado e extremamente exigente, que cada vez mais valoriza aqueles que diferenciam-se pela qualificação e pela capacidade de gerar resultados.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

A partir destes estudos realizados, algumas recomendações podem ser feitas para novos trabalhos:

- a) a empresa trabalha com diversas concentrações de resina visando obter diferentes compliâncias, de acordo com as necessidades específicas de cada com a compliância e/ou com a gramatura dos tecidos impregnados;
- b) uma vez que a cura da peça é uma reação de polimerização de resina, estudar o efeito da cura da resina em função do tempo, comparando as compliâncias das peças com o produto. Poder-se-ia verificar se é necessário trabalhar com uma gama tão variada de diluições (verificando se há diferença significativa entre os grupos) , pois este fato torna o processo de controle mais complicado;
- c) estudar as variações de processo: umidade presente no tecido versus compliância, aperto dos rolos da calandra de impregnação versus compliância, tempo de impregnação (estocagem de tecido impregnado) versus compliância;
- d) estudar os parâmetros finais de qualidade do alto-falante (QTS) e compará-los passar do tempo.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN LOUDSPEAKERS MANUFACTURERS ASSOCIATION (ALMA). **Norma EIA standard RS-438 Spider Compliance Measurement**, International Jensen Incorporated, 1997
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Medição de Frequência de Ressonância em Alto-Falantes- Método de Ensaio**, Projeto 3.02.01.19
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Alto-Falantes: Medição de Características- Método de Ensaio, NBR 5308**, 1982
- BARAJAS, Clemente Tribaldos. **Sonido Profesional**, Editorial Paraninfo, Madrid, 1996.
- BORWICK, John: **Loudspeaker and Headphone Handbook**, 2<sup>a</sup> edição Butterworth - Heineman Ltd, 1994.
- CAMPOS, Vicente Falconi. **Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia**, Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2001
- CATEN, Carla Schwengber ten. **Método de Otimização de Produtos e Processos Medidos por Múltiplas Características de Qualidade**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 1995.
- CHENG, Lin Chih [et al]. **QFD: Planejamento da Qualidade**. UFMG, Escola de Engenharia, Fundação Cristiano Ottoni, 1995.
- DICKASON, Vance. **The Loudspeakers Design Cookbook- fifth edition**, Audio Amateur Publications, Peterborough, USA 1995 ( tradução eng. Homero Sette Silva).
- EVANS, Alvis J.; ERIC J. **Automotive Sound Systems, How to Select and Install Your Own System**, Master Publishing, Inc, 1992.
- HERNANDES, Cristiane. **O Alto-falante e sua Caracterização**, Eletronica Selenium, 2001
- HORATH, Larry. **Fundamentals of Materials Science for Technologists- Properties, Testing, and Laboratory Exercises**. California University of Pennsylvania, Prentice-Hall, Inc, 1995.
- LÓPEZ, Manuel Recuero. **Ingeniería Acústica**, Editorial Paraninfo, Madrid, 1994.
- MILTON, J.S.; ARNOLD, J.C. **Introduction to Probability and Statistics: Principles and Applications for Engineering and the Computing Sciences**. 3rd Ed. McGraw-Hill, Inc., 1995.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley, New York, 1997, 5a edição.

- MOSCAL, Tony. **Sound Check, o Básico de Som e Sistemas de Sonorização**, H. Sheldon, 1994.
- NETER, John ; WASSERMAN, Willian; KUTNER, Michael H. **Applied Linear Statistical Models: Regression, Analysis of Variance and Experimental Designs**. Third Edition, Ed. Irwin, 1990.
- OLSON ,Harry F. **Acoustical Engineering**, Professional Audio Journals, Inc Pennsylvania., 1991.
- OLSON, Harry F. **Analysis of the Effects of Nonlinear Elements Upon the Performance of a Back-Enclosed, Direct Radiator Loudspeaker Mechanism**, Journal of Audio Engineering Society, abril,1962.
- RIBEIRO, José Luis Duarte. **Estrutura de Trabalhos de Conclusão Baseados em Pesquisa-ação, Estudos de Caso ou Observação Participante**. PPGEP, UFRGS. Novembro 2001,12p.
- RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla ten. **Controle Estatístico de Processo**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2000a.
- RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla ten. **Material de Suporte Projeto de Experimentos**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2000b.
- RIBEIRO, José Luis Duarte; ECHEVESTE, Márcia Elisa; DANILEVICZ, Ângela de Moura Ferreira. **A Utilização do QFD na Otimização de Produtos, Serviços e Processos**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2000c.
- SETTE SILVA, Homero e Outros. **Manual Selenium**, 2<sup>a</sup> Ed, [1992].
- SETTE SILVA, Homero. **Análise e Síntese de Alto-falantes & Caixas Acústicas pelo Método de Thielle-Small**, H. Sheldon Serviços de Marketing Ltda, 1996.
- SMALL, Richard H. **Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis**. Paper da School of Electrical Engineering, University of Sydney, Australia, 1971.
- STAROBIN, Bradley M. **Loudspeaker design**, Encyclopedia of Acoustics, edited by Malcolm J. Crocker, John Wiley & Sons, Inc. , 1997.
- TRUE, Robert J. **An Authomated Method for Measuring Spider Compliance**, AES-Audio Engineering Society Preprint 3744, 1993.
- VASSALO, Francisco Ruiz.**Manual de Caixas Acústicas e Alto-falantes**, Hemus editora Limitada, São Paulo,1985.
- WERKEMA, Maria Cristina Catarino; AGUIAR, Silvio. **Análise de Regressão: Como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo**. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais & Fundação Christiano Ottoni, 1996b, volume 7.
- WERKEMA, Maria Cristina Catarino; AGUIAR, Silvio. **Otimização Estatística de Processos: Como Determinar a Condição de Operação de um Processo que Leva ao Alcance de uma Meta de Melhoria**, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais & Fundação Christiano Ottoni, 1996a, volume 9.

**ANEXOS**

## ANEXO 1

Tabela A1- Matriz com os fatores controláveis codificados e fator de resposta.

<b>A</b>	<b>A<sup>2</sup></b>	<b>B</b>	<b>BxC</b>	<b>AxBxC</b>	<b>Y</b>
-1	1	-1	-1	1	689
-1	1	-1	-1	1	713
-1	1	-1	-1	1	728
-1	1	-1	1	-1	739
-1	1	-1	1	-1	739
-1	1	-1	1	-1	762
-1	1	1	1	1	679
-1	1	1	1	1	709
-1	1	1	1	1	691
-1	1	1	-1	-1	677
-1	1	1	-1	-1	708
-1	1	1	-1	-1	701
0	0	-1	0	0	761
0	0	-1	0	0	744
0	0	-1	0	0	734
0	0	-1	0	0	736
0	0	-1	0	0	738
0	0	-1	0	0	734
0	0	1	0	0	699
0	0	1	0	0	729
0	0	1	0	0	727
0	0	1	0	0	695
0	0	1	0	0	717
0	0	1	0	0	715
1	1	-1	1	-1	746
1	1	-1	1	-1	766
1	1	-1	1	-1	735
1	1	-1	-1	1	710
1	1	-1	-1	1	747
1	1	-1	-1	1	741
1	1	1	-1	-1	693
1	1	1	-1	-1	716
1	1	1	-1	-1	720
1	1	1	1	1	703
1	1	1	1	1	708
1	1	1	1	1	696

## ANEXO 2

QFD- MATRIZ DAS CARACTERÍSTICAS DAS PARTES

Qualidade Exigida	Funções	Peso Relativo M1	Gerar e Permitir circulação do fluxo magnético	Dissipar calor	Transformar energ. eletromag. em energ. acústica - Conjunto Móvel	Massa do Cone constante	Boa fixação na Caixa	Carcaça Reforçada	Complância do Anel de Centragem constante		Intensidade do Campo Magnético constante	Frequência de Ressonância do Cone constante
Cone mais Rígido			1	1	1	5	1	2	5		1	5
		11	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>55</b>	<b>11</b>	<b>22</b>	<b>55</b>	<b>0</b>	<b>11</b>	<b>55</b>
Vibrações Estranhas			5	1	1	1	5	5	1		1	1
		1	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Não descolar			1	1	1	1	2	5	1		1	1
		22	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>44</b>	<b>110</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>22</b>	<b>22</b>
Quebra da Cordoalha			1	1	1	1	2	5	1		1	1
		4	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>20</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
Rendimento			2	5	5	2	1	1	5		5	1
		7	<b>14</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>14</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>7</b>
Baixa Distorção Harmônica			2	1	1	5	2	5	5		1	5
		8	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>40</b>	<b>16</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>40</b>
Sem Ressonâncias			2	1	1	5	5	5	5		1	5
		7	<b>14</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>35</b>



### ANEXO 3

#### QFD- MATRIZ DOS PARÂMETROS DOS PROCESSOS

Qualidade Exigida	Funções										
	Peso Relativo M1	tempo de moldagem	temperatura de moldagem	gramatura do tecido	pressao moldagem do cone de celulose	concentração do banho de celulose	numero de voltas da bobina	espessura do fio de cobre	capacidade magnetização do ímã	intensidade da magnetização	
Frequência de Ressonância	20	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1
QTS	30	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>
compliância	30	5	5	5	2	2	2	2	2	2	5
massa do cone	30	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>150</b>
resistência elétrica	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1
campo magnético do ímã	10	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
	5	1	1	1	5	5	1	1	1	1	1
	10	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
	5	2	5	5	1	1	5	5	1	1	1
	5	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
	5	2	1	1	1	1	1	1	5	5	5
	5	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso Absoluto		435	460	460	150	150	170	170	150	240	Total
Peso Relativo %	100	18%	19%	19%	6%	6%	7%	7%	6%	10%	

Correlações

FORTE = 5 Média = 2 Fraca=1