

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**EVERTON CESAR VASCONCELOS**

**UMA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROJETO  
E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS NA  
CONSTRUÇÃO DE MATRIZES QFD**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

**Orientador:** Prof. Pedro Paulo Balestrassi

**Itajubá, Julho de 2004.**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Jacqueline Rodrigues de Oliveira Balducci – CRB\_6/1698

V331a Vasconcelos, Everton Cesar.  
Uma aplicação da metodologia Projeto e Análise de Experimentos  
na construção de matrizes QFD. / por Everton César Vasconcelos. --  
Itajubá (MG) : [s.n.], 2004.  
186 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá -  
Departamento de Produção.

1. QFD. 2. DOE. 3. MIG Pulsado. I. Balestrassi, Pedro Paulo, orient.  
III. Universidade Federal de Itajubá -Departamento de Energia. IV.  
Título.

CDU 658.56 (043)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**EVERTON CESAR VASCONCELOS**

**UMA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROJETO  
E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS NA  
CONSTRUÇÃO DE MATRIZES QFD**

Dissertação submetida à banca examinadora em 14 de julho de 2004, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

**Banca Examinadora:**

Prof. José Roberto Mattos, Dr. (FAENQUIL)

Prof. José Leonardo Noronha, Dr. (UNIFEI)

Prof. Pedro Paulo Balestrassi, Dr. (Orientador)

**Itajubá, Julho de 2004.**

**À minha querida família, com carinho, admiração e respeito.**

## AGRADECIMENTOS

Senhor, meu Deus, eu agradeço por mais esta conquista, são tantos aqueles que foram colocados em meu caminho, e que são responsáveis pelo sucesso deste trabalho, a quem dedico especial gratidão e ficam os meus eternos agradecimentos:

Aos meus pais Carlos e Sueli que foram a base de tudo, mesmo não tendo os recursos necessários souberam dar apoio, carinho, amor e empenho. Assim conseguiram com que eu concluísse o curso superior. Ao meu irmão, Ederson que sempre me apoiou e sempre foi uma mão a me ajudar, principalmente naquela hora de ‘aperto’.

Aos professores Alexandre Pinho e Luís Fernando Barca por ter me recomendado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia da Produção.

Ao meu orientador, professor Pedro Paulo Balestrassi, pelo apoio, atenção e confiança em mim depositado na execução deste trabalho.

Ao professor Sebastião Carlos Costa, pela disposição paciência, dedicação, pelos dados fundamentais no levantamento das necessidades dos clientes e principalmente pela disposição dos recursos para a realização dos ensaios.

Aos amigos Anderson e Francisco pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa e condução dos trabalhos.

Aos amigos do programa de Pós-graduação da produção: Eduardo, Éricka, Kwami, Fabiano, Ricardo, Cléber e Raquel agradecem-os pelo companheirismo.

Aos funcionários da secretaria da PPG, Débora e Cristina Silva pela dedicação, competência e, principalmente pela amizade.

Aos funcionários da biblioteca e do IEM, pela atenção.

Ao Instituto Hawkes, a Viviane e Luciana e Ilicinea, pela revisão deste trabalho.

Ao aluno da graduação Marcelo Souza Dantas, pelo auxílio no desenvolvimento dos ensaios.

A banca examinadora, cujas correções, foram de grande valia a este trabalho.

Enfim, agradeço Senhor, pelas dificuldades que não me deixaram envaidecer frente algumas vitórias. E espero que outros que trilharem este caminho encontrem o apoio, a atenção e a amizade por mim compartilhados, enquanto estive desenvolvendo este trabalho. Assim seja.

# SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| <b>Dedicatória</b>  | iv   |
| <b>Agradecimentos</b>   | v    |
| <b>Sumário</b>  | vi   |
| <b>Resumo</b>   | viii |
| <b>Abstract</b>   | ix   |
| <b>Lista de Figuras</b>   | x    |
| <b>Lista de Tabelas</b>   | xii  |
| <b>Lista de Abreviaturas</b>                                      | xiv  |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>  | 1    |
| 1.1. Considerações Iniciais                                       | 1    |
| 1.2. Objetivos  | 2    |
| 1.3. Justificativa da Escolha do Tema                             | 3    |
| 1.4. Contribuições do Trabalho                                    | 5    |
| 1.5. Metodologia de Pesquisa                                      | 5    |
| 1.6. Limitações do Trabalho                                       | 8    |
| 1.7. Estrutura da Dissertação                                     | 9    |
| <b>2. DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE (QFD)</b>                 | 10   |
| 2.1. Considerações Iniciais                                       | 10   |
| 2.2. Uma Breve Revisão da História do QFD                         | 12   |
| 2.3. Campos Funcionais do QFD                                     | 17   |
| 2.4. Aplicações Indústrias do QFD                                 | 21   |
| 2.5. Desenvolvimento Metodológico do QFD                          | 25   |
| 2.6. As Diferentes Abordagens do QFD                              | 32   |
| 2.7. Casa da Qualidade: Conceitos e Métodos                       | 37   |
| 2.8. Os Benefícios do QFD   | 59   |
| 2.9. Considerações Finais   | 61   |
| <b>3. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DOE)</b>                 | 62   |
| 3.1. Considerações Iniciais                                       | 62   |
| 3.2. Terminologia   | 64   |
| 3.3. Princípios Básicos   | 66   |
| 3.4. Etapas do Planejamento Experimental                          | 67   |
| 3.5. Benefícios e Aplicações do Projeto e Análise de Experimentos | 70   |
| 3.6. Estratégias de Experimentação                                | 72   |
| 3.7. Tipos de Projeto e Análise de Experimentos                   | 73   |
| 3.8. Experimentos Fatoriais                                       | 73   |
| 3.9. Experimento fatorial completo $2^k$                          | 75   |
| 3.10. Meia-Fração dos Experimentos Fatoriais $2^k - 2^{k-p}$      | 93   |
| 3.11. Otimização Multivariada                                     | 99   |
| 3.12. Considerações Finais  | 103  |
| <b>4. PROCESSO DE SOLDAGEM MIG PULSADO</b>                        | 104  |
| 4.1. Considerações Iniciais                                       | 104  |
| 4.2. Uma Breve Revisão da História do Processo MIG/MAG            | 106  |
| 4.3. Características Gerais                                       | 107  |
| 4.4. Equipamentos   | 108  |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.5.  | Variáveis do Processo   | 109 |
| 4.6.  | Tipos de transferência Metálica   | 113 |
| 4.7.  | MIG/MAG Pulsado   | 116 |
| 4.8.  | Considerações Finais  | 119 |
| 5.    | <b>MODELAGEM EXPERIMENTAL</b>   | 120 |
| 5.1.  | Considerações Iniciais  | 120 |
| 5.2.  | Construção da Matriz QFD  | 121 |
| 5.3.  | Determinação do Objetivo do QFD   | 122 |
| 5.4.  | Obtenção das Informações do Cliente   | 123 |
| 5.5.  | Identificação do Grau de Importância dos Requisitos do Cliente                    | 128 |
| 5.6.  | A Extração da Tabela de Desdobramento das Características do Processo             | 128 |
| 5.7.  | O Processo de Relação   | 129 |
| 5.8.  | O Processo de Conversão – Priorização das Características de Processo             | 129 |
| 5.9.  | O Estabelecimento dos Valores Estratégicos para As Características do<br>Processo | 130 |
| 5.10. | Análise da Matriz QFD   | 162 |
| 5.11. | Considerações Finais  | 164 |
| 6.    | <b>CONCLUSÃO</b>  | 165 |
| 6.1.  | Conclusão   | 165 |
| 6.2.  | Recomendações para Futuros Trabalhos  | 168 |
|       | <b>APÊNDICE A - Tabela de dados e cálculos do Experimento</b>                     | 169 |
|       | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>   | 171 |
|       | <b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR</b>  | 181 |
|       | <b>ANEXO A -Tabela de Classificação dos projetos experimentais</b>                | 183 |

## RESUMO

Esta dissertação apresenta um modelo sintético de aplicação do Desdobramento da Função Qualidade (QFD) realizada no processo de soldagem em chapas finas pelo método MIG/MAG pulsado. Apresenta também um modelo auxiliar para a determinação dos valores estratégicos (Quantos) de uma matriz QFD, baseada na ferramenta estatística Projeto e Análise de Experimentos (DOE).

O trabalho apresenta uma breve visão da tendência atual dos pesquisadores em incrementar a eficiência do QFD, através da aplicação de algumas técnicas e procedimentos durante todas as fases de desenvolvimento do método, com o objetivo de torná-lo mais rigoroso e operacional. O trabalho também evidencia uma revisão bibliográfica sobre o método QFD e sobre o Projeto e Análise de Experimentos (DOE), através de sua origem, aplicação, vantagens e benefícios e seqüência de passos para a sua aplicação.

Durante a aplicação da metodologia QFD no âmbito do processo MIG/MAG pulsado, utilizou-se de três métodos (DOE, Opinião dos especialistas, Referências técnicas), para realizar a avaliação dos valores estratégicos (Quantos) de uma matriz QFD. Os resultados alcançados pelos três métodos foram comparados entre si com o objetivo de encontrar a melhor especificação para os parâmetros de pulso, para que se obtenha uma maior satisfação do cliente.

Por fim é apresentada a conclusão referente aos objetivos da pesquisa, bem como recomendação para futuras pesquisas.

## ABSTRACT

*This thesis work presents a synthetic model of application of the Quality Function Deployment (QFD) accomplished in the process of welding in fine foils for the Pulsed MIG/MAG method. This work presents an auxiliary model for the determination of the strategic values (How many) of a main QFD, based on the statistical Design of Experiments (DOE) tool.*

*The work presents a brief vision of the researchers' current tendency in increasing the efficiency of QFD through the application of some techniques and procedures during all the phases of development of the method with the objective of turning it more rigorous and operational. The work also evidences a bibliographical revision on the method QFD and on Design of Experiments (DOE), through its origin, application, advantages and benefits and sequence of steps for its application*

*During the application of the methodology QFD in the range of the process pulsed MIG/MAG, it was used three methods (DOE, the specialists' Opinion, technical References), to accomplish the evaluation of the strategic values (How many) of a main QFD. The results reached by the three methods that were compared among themselves with the objective of finding the best specification for the pulse parameters, so that it can obtain a larger satisfaction of the customer.*

*Finally, the conclusion presents the results regarding to the objectives of the research, as well as a recommendation for future researches.*

## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1. 1 – Etapas necessárias para a condução de uma pesquisa experimental.       | 8   |
| Figura 2. 1 – Essência do QFD  | 12  |
| Figura 2. 2 – Evolução do QFD Brasil nos últimos anos.                               | 17  |
| Figura 2. 3 – Métodos que podem ser integrados ao QFD                                | 27  |
| Figura 2. 4 – Fases do modelo de Akao  | 33  |
| Figura 2. 5 – O Modelo de quatro fases do QFD  | 37  |
| Figura 2. 6 – Casa da Qualidade: Descrição Resumida                                  | 38  |
| Figura 2. 7 – Casa da Qualidade: Descrição detalhada                                 | 39  |
| Figura 2. 8 – Os benefícios qualitativos do uso do QFD                               | 60  |
| Figura 3. 1– Modelo geral de um processo ou sistema                                  | 63  |
| Figura 3. 2 – Regiões de rejeição e não-rejeição para uma distribuição F             | 80  |
| Figura 3. 3 – Representação gráfica do projeto Fatorial $2^3$                        | 86  |
| Figura 3. 4 – Gráfico dos Efeitos principais do Planejamento Fatorial $2^k$          | 90  |
| Figura 3. 5 – Gráfico dos Efeitos das interações do Planejamento Fatorial $2^k$      | 90  |
| Figura 3. 6 – Gráfico de Probabilidade Normal dos Efeitos, um Exemplo Fatorial $2^3$ | 91  |
| Figura 3. 7 – Gráfico de definição da desejabilidade (maximizar/minimizar)           | 102 |
| Figura 3. 8 – Gráfico de definição da desejabilidade (Alvo)                          | 103 |
| Figura 4. 1 – Processo de soldagem MIG/MAG   | 105 |
| Figura 4. 2 – Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG                       | 109 |
| Figura 4. 3 – Tipos de transferências entre o eletrodo e o metal base                | 114 |
| Figura 4. 4 – Esquema da onda Pulsada e seus componentes                             | 117 |
| Figura 5. 1 – Representação da área da seção transversal do cordão de solda          | 125 |
| Figura 5. 2 – Esquema do banco de ensaio   | 136 |
| Figura 5. 3 – Gráfico dos Efeitos principais para o IR                               | 138 |
| Figura 5. 4 – Distribuição Normal de probabilidade para o IR                         | 139 |
| Figura 5. 5 – Gráfico dos Efeitos principais para o IR                               | 140 |
| Figura 5. 6 – Gráfico das Interações entre os Efeitos para o IR                      | 141 |
| Figura 5. 7 – Gráfico de Pareto dos Efeitos para o IC                                | 144 |
| Figura 5. 8 – Gráfico da Distribuição Normal de probabilidade para o IC              | 145 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5. 9 – Gráfico dos Efeitos principais para o IC                  | 145 |
| Figura 5. 10 – Gráfico das Interações entre os Efeitos para o IC        | 146 |
| Figura 5. 11 – Gráfico de Pareto dos Efeitos para a D                   | 148 |
| Figura 5. 12 – Gráfico da Distribuição Normal de probabilidade para a D | 149 |
| Figura 5. 13 – Gráfico dos Efeitos principais para a D                  | 149 |
| Figura 5. 14 – Gráfico de Pareto dos Efeitos para a P                   | 152 |
| Figura 5. 15 – Gráfico da Distribuição Normal de probabilidade para o P | 152 |
| Figura 5. 16 – Gráfico dos Efeitos principais para a P                  | 153 |
| Figura 5. 17 – Definição dos valores para a otimização.                 | 154 |
| Figura 5. 18 – Gráfico da Resposta Otimizada para os Fatores.           | 157 |
| Figura 5. 19 – Matriz QFD para o processo MIG pulsado                   | 164 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2. 1 – Estrutura Hierárquica dos Requisitos dos Clientes:                    | 42  |
| Tabela 2. 2 – Critério para Avaliação do Argumento de vendas                        | 46  |
| Tabela 2. 3 – Valores e símbolos utilizados para representar as relações.           | 50  |
| Tabela 2. 4 – Critério para o preenchimento da matriz de correlação técnica.        | 52  |
| Tabela 2. 5 – Uma casa da Qualidade Geral   | 53  |
| Tabela 3. 1 – Matriz de planejamento para um planejamento fatorial $2^k$ genérico   | 75  |
| Tabela 3. 2 – Arranjo dos Dados para um planejamento fatorial com dois fatores      | 77  |
| Tabela 3. 3 – Graus de Liberdade  | 80  |
| Tabela 3. 4 – Análise de Variância Para Um Fatorial Com Dois Fatores                | 83  |
| Tabela 3. 5 – Análise de Variância para o Modelo de Efeitos Fixos com Três Fatores  | 84  |
| Tabela 3. 6 – Tabela de Sinais, para auxílio do cálculo do efeito fatorial          | 88  |
| Tabela 3. 7 – Tabela do numero de testes contidos em um planejamento Fatorial $2^7$ | 94  |
| Tabela 3. 8 – Tabela de sinais para um Planejamento Fatorial $2^3$                  | 96  |
| Tabela 5. 1 – Desdobramento do Planejamento do QFD.                                 | 122 |
| Tabela 5. 2 – Desdobramento dos requisitos do Cliente                               | 125 |
| Tabela 5. 3 – Grau de importância dos requisitos do Cliente                         | 128 |
| Tabela 5. 4 – Características de processo incorporadas ao QFD                       | 129 |
| Tabela 5. 5 – Parâmetros mantidos constantes durante o experimento                  | 132 |
| Tabela 5. 6 – Composição Química (%) do aço ABNT 1045.                              | 133 |
| Tabela 5. 7 – Níveis Operacionais dos fatores.                                      | 133 |
| Tabela 5. 8 – Tabela do planejamento Experimental                                   | 135 |
| Tabela 5. 9 – Sequenciamento e resultados dos experimentos                          | 137 |
| Tabela 5. 10 – Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab para IR              | 142 |
| Tabela 5. 11 – Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab para IC.             | 147 |
| Tabela 5. 12 – Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab para D.              | 151 |
| Tabela 5. 13 – Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab – para P.            | 154 |
| Tabela 5. 14 – Relação entre os parâmetros e as repostas desejadas                  | 155 |
| Tabela 5. 15 – Quadro Resumo das Respostas Obtidas                                  | 158 |
| Tabela 5. 16 – Quadro Resumo das Respostas Obtidas para a Opinião do Especialista   | 159 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 5. 17 – Quadro Resumo das Respostas Obtidas para a utilização de referências | 160 |
| Tabela 5. 18 – Quadro Resumo das Respostas  | 161 |
| Tabela 5. 19 – Valores estratégicos para a Matriz QFD                               | 162 |

## LISTA ABREVIATURAS

- AQC - *Annual Quality Congress*
- AHP - *Analytical Hierarchical Process*
- ASI - *American Supplier Institute*
- ASQ - *American Society Quality*
- CA - Ciclo Ativo
- D - Diluição
- DFMA - *Design for Manufacturing and Assembly* - Projeto para a Manufatura e Montagem
- DOE - *Design of Experiment* - Projeto e Análise de Experimentos
- FMEA - Análise de Modo e Efeito de Falhas
- FTA - Análise de Árvore de Falhas
- GMAW - *Gas Metal Arc Welding*
- GOAL/QPC - *Growth Opportunity Alliance of Lawrence/Quality Productivity Center*
- HOQ - Casa da Qualidade – *House of Quality*
- I<sub>b</sub> - Corrente de Base
- IC - Índice de Convexidade
- ICQC - *International Congress Quality Control*
- ICQFD - *International Council Of QFD*
- I<sub>m</sub> - Corrente Média
- I<sub>p</sub> - Corrente de Pico
- IR - Índice de Respingo
- LS - Laboratório de Soldagem
- MAG - *Metal Active Gas*
- MIG - *Metal Inert Gas*
- P - Penetração
- PTP - Padrão Técnico de Processo
- QD - Desdobramento da Qualidade
- QFD - *Quality Function Deployment* - Desdobramento da Função Qualidade
- QFD<sub>r</sub> - Desdobramento da Função Qualidade Restrito

SQC - *Statiscal Quality Control* - Controle Estatístico da Qualidade

TIG - *Tungstênio Inert Gas*

TQC - *Total Quality Control* - Controle da Qualidade Total

TQM - *Total Quality Management*

VA - Velocidade de Alimentação do Arame

VR - Variável Resposta

## 1. Introdução

Esse capítulo tem a finalidade de discutir aspectos de grande importância do presente trabalho. Nesta seção, são realizadas algumas considerações iniciais, e sendo também apresentado o objetivo do trabalho, a relevância, a metodologia de pesquisa e a justificativa.

### 1.1 Considerações Iniciais

As constantes evoluções nos sistemas de produção têm procurado atender, em grande parte, às necessidades dos clientes. O mercado, desde então, vem se tornando cada vez mais competitivo. As empresas para sobreviver neste ambiente, necessitam dar respostas rápidas, acompanhando estas evoluções. Deste modo, no processo de desenvolvimento e lançamento de produtos e no gerenciamento adequado dos recursos de produção deve-se ter em mente todos os fatores críticos para serem ponderados, para que a decisão tomada seja a melhor possível.

Com a pressão do mercado, as empresas necessitam desenvolver e lançar produtos com o máximo de rendimento possível de todos os seus recursos. A capacidade de gerenciar recursos e de desenvolver produtos com sucesso é fundamental para manter a competitividade de uma empresa (PRATES, 1998). Para atender as exigências do mercado, as indústrias enfrentam, entre outros problemas, a necessidade de estar atendendo a determinação dos clientes na fabricação de novos produtos. Segundo Oliveira *et al.* (2000), é necessário identificar e priorizar as características da qualidade do produto que realmente refletem as necessidades dos clientes para obtenção de sucesso no processo de desenvolvimento de novos produtos. Ainda para o mesmo autor, as informações geradas pelos clientes devem ser bem gerenciadas ao longo do processo de desenvolvimento, de forma que os esforços despendidos nesta atividade tragam o retorno esperado. No processo de desenvolvimento de novos produtos, a equipe responsável depara com inúmeras dificuldades na realização de algumas atividades do projeto. Os autores, afirmam que estas dificuldades podem ser minimizadas, quando as pessoas envolvidas além de serem bem capacitadas tecnicamente, detenham o conhecimento de alguns métodos e técnicas gerenciais que lhes auxiliam a lidar com estas dificuldades de projeto.

Com o advento da tecnologia, bem como a evolução das ciências com bases computacionais muito mais precisas, confiáveis e acessíveis, têm-se tornado o processo de desenvolvimento e fabricação de novos produtos. Aliado a esse fato, ferramentas gerenciais, estatísticas e de planejamento vem ganhando espaço dentro das instituições de pesquisas e nas organizações de um modo geral. E quanto mais se desenvolvem esses métodos, mais se observa a potencialização de seus efeitos quando combinados no sentido de atingir uma excelência em projeto, desenvolvimento e fabricação de produtos, garantindo alta qualidade e satisfação das necessidades dos clientes. Segundo Oliveira *et al.* (2000), muitos autores já propõem integração entre estas ferramentas.

O QFD se destaca como uma excelente alternativa para explicar e transmitir as informações geradas no processo de desenvolvimento de produtos. Para Chan *and* Wu (2002b), o QFD é um conceito global que fornece meios de traduzir as exigências dos clientes em exigências técnicas apropriadas para cada fase do processo de desenvolvimento de produtos.

Oliveira *et al.* (2000) ainda ressaltam que a busca de novas informações exige um considerável conhecimento técnico por parte da equipe a respeito do produto que está sendo desenvolvido. Em alguns casos, o conhecimento técnico necessário deve ser gerado através de experimentações sendo, nestes casos, o uso das técnicas estatísticas de planejamento e análise de experimentos muito importantes ao processo de desenvolvimento de produtos.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivos principais:

- 1 Apresentar um método de determinação da Qualidade Projetada (valores objetos ou estratégicos) na construção de matrizes QFD, utilizando a técnica DOE (Projeto e Análise de Experimentos – *Design of Experiments*).
- 2 Demonstrar que o uso integrado de métodos científicos (DOE) já consagrados pode, dentro do planejamento da qualidade (QFD), aumentar a eficácia, buscando estabelecer critérios menos arbitrários e mais estatísticos.

Os objetivos secundários da pesquisa são os seguintes:

- 1- Confeccionar uma matriz QFD para analisar o processo MIG pulsado, utilizando-se dos parâmetros de pulso como os requisitos de processo, com a finalidade de introduzir os requisitos dos clientes (Qualidade dos cordões de solda).

- 2- Analisar os efeitos dos parâmetros de pulso sobre a qualidade dos cordões de solda em chapas de aço pelo processo MIG pulsado, utilizando, como ferramenta, o Projeto e Análise de Experimentos.

### 1.3 Justificativa da Escolha do Tema do Trabalho

Diversos são os motivos que justificam a escolha do tema estudado, entre eles destacam-se:

- a) A possibilidade de integração entre o QFD e outras técnicas e métodos.

O que se observa através da revisão bibliográfica é que a eficiência do QFD começa a ser incrementada pela utilização de várias técnicas e métodos em sua confecção. Chan *and* Wu, (2002b) afirmam que muitas metodologias estão sendo adaptadas e aplicadas ao QFD para torná-lo mais rigoroso e operacional. Este fato, segundo Cristiano *et al.* (2000), é devido à popularização e ao amadurecimento do método QFD. Conforme salienta Cristiano *et al.* (2000) e Chan *and* Wu, (2002b), pode ser verificado pelas publicações sobre o método QFD nos Estados Unidos e no Japão, que têm alterado o seu enfoque para a integração de ferramentas analíticas na metodologia de QFD, particularmente, na matriz Planejamento de Produto.

- b) Técnicas de Planejamento da qualidade baseiam-se em argumentos Qualitativos, o que muitas vezes podem tornar a análise subjetiva.

Conforme salienta Oliveira (1999), o QFD é adequado para processar, transmitir e armazenar as informações sobre os diversos aspectos do produto. Para que o processo se torne eficiente, é fundamental que as informações que alimentam o processo sejam confiáveis. Portanto, as informações coletadas devem originar-se de fontes seguras, donde se pode garantir a sua confiabilidade. Logo, torna-se necessário medir, experimentar e analisar todas as informações coletadas para serem utilizadas no método.

- c) Pouca informação foi encontrada em artigos e publicações referentes ao emprego de métodos científicos para a determinação dos valores objetos ou estratégicos, junto a matriz QFD.

Da revisão bibliográfica de aproximadamente 90 referências (teses, dissertações e artigos) no período de julho de 2002 a fevereiro de 2004, foram encontradas apenas 3 publicações retratando alguns métodos de cálculo para os valores objetos ou estratégicos de uma matriz QFD.

- d) Pouca informação foi encontrada em artigos e publicações referentes ao emprego do projeto e análise de experimentos - DOE, junto a matriz QFD.

Do estudo da revisão bibliográfica realizada por Chan *and* Wu (2002a), de cerca de 720 referências sobre o método QFD, apenas uma retratava a integração do DOE. Outro fator importante a ser ressaltado é que, da pesquisa realizada por Cristiano *et al.* (2000) nas indústrias americanas e japonesas, apenas 10% dos respondentes utilizam o DOE ou outro método estatístico junto ao QFD.

e) Expressivo interesse industrial em função do pouco conhecimento que envolve o assunto MIG Pulsado.

Este fato é devido à soldagem de metais ser um processo de constante desenvolvimento, resultado de uma crescente diversificação dos aços, bem como da sua aplicação em construções de alto risco. A utilização destas técnicas muito tem a acrescentar em termos de melhoria (RIBEIRO, 2002). Os processos de soldagem se apresentam, hoje em dia, como responsáveis por um número substancial de problemas de cunho industrial, sendo considerados gargalos em muitas empresas devido a pouca informação disponível a respeito da influência de seus parâmetros no comportamento dos cordões de solda.

f) Expressivo interesse industrial em função do pouco conhecimento que envolve o assunto projeto e análise de experimentos – DOE.

O DOE, apesar de ter sido desenvolvido no início do século XX, tornou-se uma das mais poderosas ferramentas de otimização de processo conhecidas com o advento da popularização da metodologia Seis Sigma. Baseado neste aspecto, o método científico projeto e análise de experimentos – DOE vem, gradativamente, sendo utilizado com grande êxito na elucidação de problemas de cunho industriais por definir quais dados, em que quantidades e em que condições devem ser coletados e controlados durante um determinado experimento buscando, basicamente, satisfazer maior precisão estatística possível na resposta com menor custo operacional. É, portanto, uma técnica de extrema importância para os processos industriais, pois seu emprego garante resultados confiáveis, com economia de tempo e dinheiro, parâmetros fundamentais em tempos de concorrência acirrada.

g) Facilidade de acesso a um banco de ensaios adequado a realização dos experimentos.

O laboratório de soldagem (LSO) da UNIFEI conta com fontes digitalizadas, que possibilitam o controle preciso dos parâmetros, de maneira a facilitar a coleta e análise dos dados, além de garantir a repetitividade dos ensaios.

## 1.4 Contribuição do Trabalho

A principal contribuição deste trabalho refere-se à introdução de um método de cálculo para os valores objetos ou estratégicos baseado em experimentações e em argumentos estatísticos e quantitativos. Na revisão bibliográfica, foram encontrados poucos artigos referenciando alguns métodos de cálculo para os valores objetos ou estratégicos, dentre eles Breyfogle (2000), Cheng *et al* (1996) e Silva (1996), os quais serão abordados oportunamente.

Outra contribuição deste trabalho refere-se à análise da influência dos parâmetros de pulso na soldagem de chapas finas, objetivando, desta forma, um maior domínio do processo. Uma outra contribuição do trabalho é mostrar uma aplicação prática do DOE.

## 1.5 Metodologia de Pesquisa

Conforme estabelece Thiollent (1986), *“a metodologia de pesquisa pode ser vista como o conhecimento geral e a habilidade que são necessários ao pesquisador para se orientar no processo de investigação, tomar decisões oportunas, selecionar conceitos, hipóteses e dados adequados”*. A partir desta abordagem observa-se a importância de se definir, com a maior antecedência possível, a metodologia de pesquisa a ser empregada. Nakano *and* Fleury (1996) afirmam que uma base de conhecimento suficientemente sólida acerca da metodologia de pesquisa é o principal para o pesquisador conduzir o seu trabalho.

Para determinar a metodologia de pesquisa a ser adotada, segundo Silva *and* Menezes (2001), torna-se necessário definir alguns termos relevantes à pesquisa (pergunta de pesquisa e escolha das hipóteses), além de classificá-la conforme a sua natureza, a forma de abordagem do problema e o ponto de vista dos procedimentos técnicos.

Inicialmente, para determinação da metodologia, identificou-se a pergunta de pesquisa e escolheram-se as hipóteses (proposições) referentes ao estudo através de uma revisão bibliográfica. Para este trabalho, estipulou-se a seguinte pergunta de pesquisa: *“Como determinar a configuração ótima dos valores objetos (ou estratégicos) em uma matriz QFD, a fim de que se possa melhor satisfazer os requisitos (necessidades) dos clientes conforme suas proposições?”* A partir da pergunta de pesquisa, determinou-se a seguinte hipótese para o estudo:

A utilização da metodologia DOE na determinação dos Valores Objetos encontra a melhor especificação para as Características da Qualidade e/ou Processo (valores objetos ou

estratégicos), para que se obtenha o melhor desempenho nos requisitos dos clientes em uma matriz QFD.

Após esta análise inicial, classificou-se a pesquisa desenvolvida neste trabalho de acordo com as informações estabelecidas por Silva *and* Menezes (2001). Do ponto de vista da natureza da pesquisa, a análise apresentada neste trabalho pode ser classificada como uma pesquisa básica onde, segundo os autores, tem o objetivo de gerar novos conhecimentos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista envolvendo interesses universais. O que pode ser observado, segundo os objetivos estabelecidos nesta dissertação (ver seção 1.2), pretende-se realizar um estudo da metodologia DOE como forma de determinação da melhor configuração dos Valores Objetos em uma matriz QFD.

Do ponto de vista da forma da abordagem do problema, a análise apresentada neste trabalho pode ser classificada como uma pesquisa quantitativa. Segundo Bryman (1989) e Silva *and* Menezes (2001), este fato deve-se à análise, apresentada neste trabalho, ser baseada em uma experimentação onde a ênfase na interpretação do pesquisador não é muito pronunciada. O experimento é baseado em argumentos quantificáveis, possuindo um enfoque estruturado com uma única fonte de informação, requerendo o uso de recursos estatísticos. Outro fator importante ressaltado por Bryman (1998) é a necessidade da pesquisa qualitativa manter o seu foco em quatro características básicas: mensuração, casualidade, generalização e a replicação, com os quais se permite que as conclusões do pesquisador possam ser verificadas. Estas características básicas, apresentadas pelo autor à pesquisa qualitativa, podem ser verificadas através da realização do experimento baseado nos procedimentos definidos pela metodologia DOE, o que caracteriza o estudo como uma pesquisa qualitativa.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a análise, apresentada neste trabalho, pode ser classificada como uma estratégia baseada na Pesquisa Experimental, pois, de acordo com Yin (1997), as condições de estabelecimento para este tipo de classificação são as seguintes: (i) O tipo de pergunta de pesquisa proposta; (ii) O grau de controle que o pesquisador tem sobre o comportamento dos eventos; (iii) O foco que a pesquisa dá aos eventos contemporâneos sobre os históricos. A primeira condição, segundo o autor, é a mais importante para a diferenciação das várias estratégias de pesquisa, é a identificação do tipo de pergunta da pesquisa. Ao se realizar o estudo nas três condições descritas pelo autor (i, ii e iii) para a condição da pesquisa a ser desenvolvida, pode-se concluir que a melhor estratégia será a Pesquisa Experimental, pois, de

acordo com Bryman (1998) e Yin (1994), a ‘Pesquisa Experimental’ é uma metodologia de pesquisa adequada quando a questão de pesquisa é da forma “como? (How) ou Por quê? (Why)”; quando o controle que o investigador exerce sobre os eventos de pesquisa é total; ou quando o foco temporal está em fenômenos contemporâneos dentro do contexto da vida real. A utilização deste tipo de pesquisa mostra-se coerente, pois o objetivo do presente trabalho é o de otimizar os Valores Objetos para as Características da Qualidade e/ou Processo, encontrando a melhor especificação de acordo com os principais requisitos dos clientes em uma matriz QFD.

Para um melhor entendimento da metodologia, Yin (1997) define que “*Experimentos são feitos quando um investigador pode manipular o comportamento de uma variável diretamente, precisamente, sistematicamente. Isto pode ocorrer em um cenário de laboratório, no qual o experimento pode focar variáveis isoladas*” ou que “*um experimento, por exemplo, deliberadamente, separa o fenômeno de seu contexto, focando sua atenção em apenas algumas variáveis (tipicamente, o contexto é controlado pelo ambiente de laboratório).*” Nakano and Fleury (1996) procuram também definir a metodologia de pesquisa experimental, enfocando que a mesma faz o teste das hipóteses através de um experimento controlado, projetado de maneira a produzir os dados necessários, podendo ser realizado em laboratório. Bryman (1998) assegura que a idéia de controle é essencial, pois o que se deseja ser capaz de demonstrar é que a alteração da variável independente é a causa da variação na variável dependente. O autor ainda salienta que o Experimento Fatorial é um método de pesquisa experimental que se baseia na adição de variáveis para moderação do relacionamento entre as outras, provocando a sua combinação e analisando seus efeitos. Diante destes argumentos contundentes apresentados por estes autores, pode-se presumir que a metodologia mais adequada para a dissertação em questão é a da “Pesquisa Experimental”.

A metodologia de pesquisa, empregada neste trabalho, pode ser vista na **figura 1.1** que apresenta as etapas necessárias para a condução de uma pesquisa experimental.

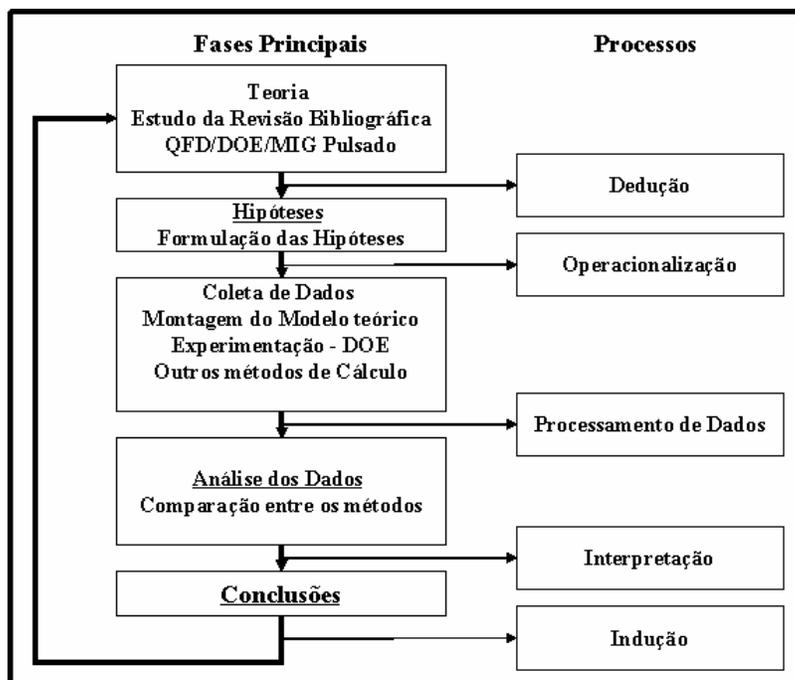


Figura 1. 1 - Etapas necessárias para a condução de uma pesquisa experimental.

Fonte: Bryman (1998)

## 1.6 Limitações do Trabalho

Este trabalho limita a demonstração da ferramenta projeto e análise de experimentos – DOE com método de cálculo para os valores objetos ou estratégicos de uma matriz QFD. Uma observação importante a ser ressaltada é a possibilidade do pesquisador em realizar o experimento, o que só pode ser verificado quando se estudam as características de processo ou produto como forma de obtenção de melhorias no desempenho do produto. Portanto, a aplicação do método DOE fica restrito a aplicações em matrizes QFD que englobam os requisitos de processo e de produto. Para esta dissertação, será utilizada apenas uma das matrizes da abordagem estabelecida por Macabe (modelo de 4 fases), englobando os requisitos de processo (parâmetros de pulso) e os requisitos de clientes determinados a partir de um estudo realizado junto a uma organização empresarial. Portanto, a aplicação registrada nesta dissertação será limitada a matriz QFD de processos, não sendo necessária a utilização das outras matizes, pois o objetivo principal da dissertação é demonstrar o uso da ferramenta projeto e análise de experimentos – DOE com o método de cálculo para os valores objetivos ou estratégicos, e não realizar uma análise profunda do processo utilizado o método QFD.

## 1.7 Estrutura da Dissertação

O trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** apresenta a importância do tema, os objetivos que se pretendem alcançar, as justificativas do tema, as contribuições, a metodologia de pesquisa adotada e, por fim, a organização do trabalho.
- **Capítulo 2 - Desdobramento da Função Qualidade (QFD):** mostra uma revisão bibliográfica sobre o QFD, assim como suas vantagens e benefícios. Descreve suas origens, suas aplicações e as versões, bem como as etapas para sua aplicação.
- **Capítulo 3 - Projeto e Análise de Experimentos (DOE):** apresenta uma revisão bibliográfica sobre o DOE, assim como suas vantagens e benefícios. Descreve sua origem, as aplicações, bem como as etapas para sua aplicação, além de uma breve explanação sobre o procedimento de cálculo para a realização de uma abordagem do método.
- **Capítulo 4 - Processo de Soldagem MIG Pulsado:** apresenta uma revisão bibliográfica sobre o Processo de Soldagem MIG Pulsado, assim como suas vantagens e benefícios. Descreve também, a origem, as variáveis do processo, bem como as características elétricas de transferência metálica no processo MIG/MAG.
- **Capítulo 5 - Modelagem Experimental:** apresenta e discute uma abordagem sintética do DOE aplicado ao QFD em um processo de soldagem MIG/MAG pulsado. Nesta seção, são abordadas as informações pertinentes a construção da matriz QFD, além do planejamento e preparação do experimento, onde se define o modo de medição das respostas, a definição das grandezas consideradas fixas e os equipamentos envolvidos.
- **Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações:** retrata as conclusões, bem como as referências para trabalhos futuros.

## 2. Desdobramento da Função Qualidade (QFD)

Este capítulo possui a finalidade de apresentar uma revisão bibliográfica sobre o QFD, assim como suas vantagens e benefícios. Descreve também a origem, as aplicações e as versões do QFD, bem como as etapas para sua aplicação, além de uma breve explanação sobre abordagens de alguns autores sobre o QFD.

### 2.1 Considerações Iniciais

De acordo com Pullmana *et al.* (2002), *“para permanecerem competitivas, as organizações tem que projetar produtos e serviços que se encontram ou excedem expectativas dos clientes. Porém, os autores afirmam que é impossível oferecer todas as características desejadas pelos clientes e permanecer com um custo competitivo”*. Cheng *et al.* (1995) e Pullmana *et al.* (2002) afirmam que os engenheiros, o pessoal de desenvolvimento técnico e peritos em qualidade tendem a usar o QFD para traduzir as necessidades dos clientes em características de projeto do produto criando operações, que determine o chamado “lucro maximizado” para as características do produto.

O QFD, segundo Chan *and* Wu (2002b), é um conceito global que provê meios de traduzir as exigências dos clientes em exigências técnicas apropriadas para cada fase de desenvolvimento de produto, processo e/ou melhoria. O QFD fornece os meios para que pessoas de diferentes atribuições participem da solução de um problema (HAUSER *and* CLAUSING, 1998).

Barros (2001), *“define o QFD como um método para desenvolver a qualidade exigida visando à satisfação do cliente, traduzindo a sua demanda para objetivos do projeto e assegurar que a meta projetada seja efetivada através das etapas de produção”*. O autor ainda salienta que o QFD se fundamenta na opinião do cliente a respeito da qualidade ideal a ser desenvolvida.

Moura (1999) afirma que o *“QFD é um método para desenvolver a qualidade, direcionando o atendimento nas satisfações dos consumidores, utilizando-se da tradução de suas necessidades e desejos para a obtenção dos objetivos, para o desenvolvimento de produtos e/ou*

*melhoria dos atuais, garantindo a qualidade do projeto desde a sua fase de idealização até as fases de comercialização e pós-venda”.*

Segundo Silva (1996) o QFD é um método específico de ouvir o que dizem os clientes. Descobrir exatamente o que eles querem e, em seguida, utilizar um sistema lógico para determinar a melhor forma de satisfazer as necessidades com os recursos existentes, buscando responder as seguintes perguntas:

- Quais são as características desejadas pelo Cliente?
- A qual/quais funções este produto ou serviço deve servir e quais funções devem ser usadas para fornecer este produto ou serviço?
- À base dos recursos disponíveis, qual a melhor maneira de oferecer o que o cliente deseja?

Cheng *et al.* (1995) afirmam que o QFD possui três princípios embutidos sendo que cada um expressa um par de idéias. O primeiro princípio é o da Subdivisão e da Unificação que podem ser vistos como processos de análise e síntese, pois de acordo com o autor é necessário se conhecer, de uma forma mais detalhada, tanto a qualidade quanto o trabalho a ser realizado. Uma vez detalhado, é necessário uni-los, classificando-os em grupo.

O segundo princípio é o da Pluralização e da Visibilidade, que, conforme o autor, também permeia todas as fases do QFD. A pluralização é a consideração das matrizes sobre perspectivas distintas, tais como: a perspectiva de mercado, manifestada através da tabela de desdobramento da qualidade exigida. Quanto à atribuição de visibilidade, Cheng *et al.* (1995) afirmam que ela está presente como fornecedora da explicitação e visualização das informações. De acordo com o autor, esta característica é certamente crucial para que as percepções e experiências dos membros sejam escrutinadas por outros membros.

O terceiro princípio é o da Totalização e do Parcelamento que conforme Cheng *et al.* (1995) também está presente em todo o processo de operacionalização do método QFD. O autor afirma que é necessário ter a visão do todo, sem, entretanto, perder de vista as partes mais importantes, pois há limites de recursos e tempo – o conceito da priorização. Uma vez identificadas as partes importantes, passa-se a ampliá-las, de forma a conhecer profundamente os seus detalhes, e assim sucessivamente.

O QFD é uma ferramenta utilizada na organização, facilitando a adoção da concepção centrada no usuário (*market in*). É uma maneira sistemática de realizar o Planejamento da Qualidade (SILVA, 1996). Campos (1992), apresenta a essência do QFD através da **figura 2.1**.

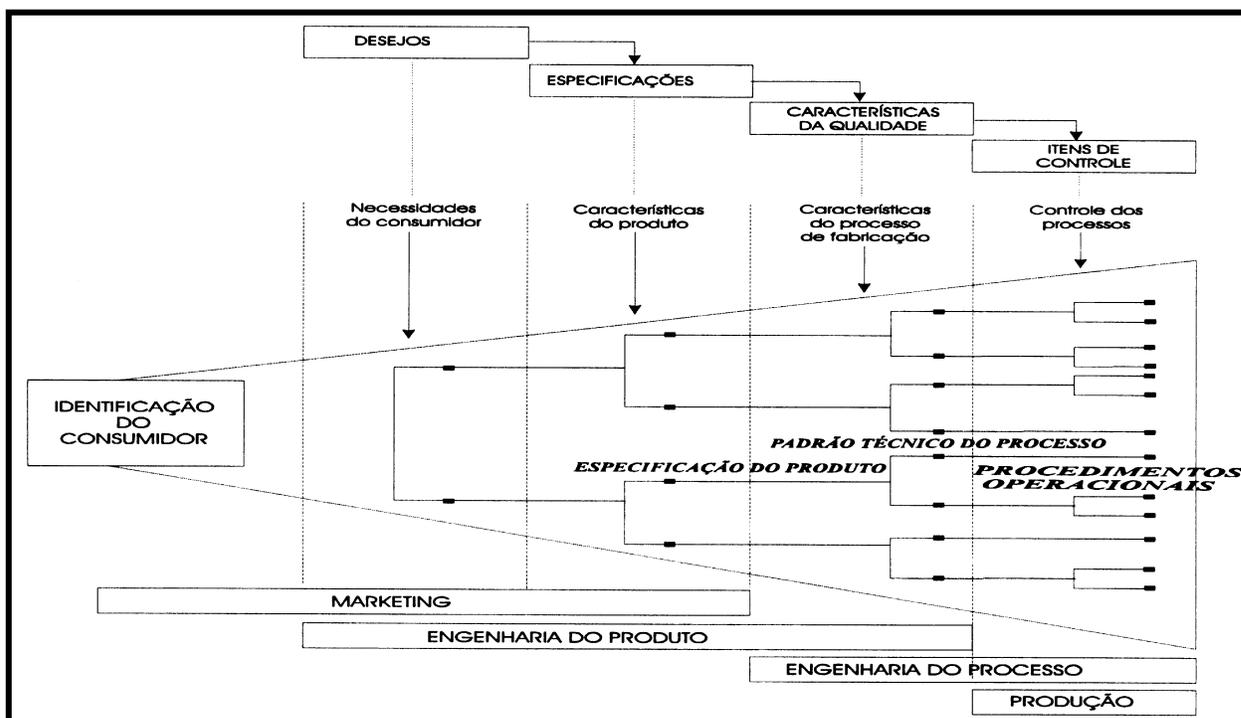


Figura 2. 1 – Essência do QFD

Fonte: Campos (1992)

## 2.2 Uma Breve Revisão da História do QFD

### 2.2.1 Origem de QFD

Segundo Chan *and* Wu (2002b), nos recentes anos sessenta e setenta, Joji Akao e outros pesquisadores foram trabalhar na melhoria do processo de projetos de novos produtos. Com o objetivo de trazer alta qualidade aos novos produtos desde o princípio do projeto. Este processo de melhoria do processo de projeto de novos produtos foi chamado de Desenvolvimento de Função de Qualidade - QFD. Os autores ainda afirmam que de 1975 a 1995, este processo era utilizado de forma integrada com outras ferramentas de melhoria, de forma a gerar um mosaico de oportunidades para os projetistas de novos produtos.

Silva (2002) salienta que já na década de 60, no Japão as organizações já davam uma maior ênfase ao desenvolvimento de novos produtos e o rápido crescimento da indústria automobilística japonesa nesta época, promovia desenvolvimento de novos automóveis e mudanças de modelos. Conforme Akao (1995) e Cristiano *et al.* (2000), nesta ocasião, dois pontos serviram como partida para a evolução do QFD. Os dois motivos principais que conduziram a criação do QFD no Japão foram:

1. Início de uma maior ênfase à qualidade projetada, entretanto não existia nenhuma bibliografia acerca deste assunto.
2. O Padrão Técnico de Processo (PTP) estava sendo utilizado, mas o mesmo não era elaborado pela produção depois de iniciada a fabricação de um novo produto.

Então, está claro de acordo com Akao (1995), Chan *and* Wu (2002b) e Cristiano *et al.* (2000), que a necessidade dos projetistas pela melhoria dos seus trabalhos levou ao desenvolvimento da função de qualidade no Japão. E segundo Akao (1995) o QFD foi desenvolvido em um ambiente como um método ou um conceito dentro da filosofia TQC (*Total Quality Control* – Controle da Qualidade Total).

### 2.2.2 Desenvolvimento do QFD no Japão

Em 1946, após a II Guerra Mundial, o governo americano enviou W. Edward Deming para auxiliar a recuperação das indústrias japonesas. A introdução do Controle Estatístico da Qualidade (SQC - *Statistical Quality Control*), liderado por Deming no Japão, de acordo com ASQ (2003), tornou-se a principal atividade da gerência industrial nesse país, visando garantir a qualidade dos produtos através do controle estatístico do processo (CHENG *et al* 1995)

Entre os anos 50 e o início dos 60, Armand V. Feigenbaum da GE (General Electric), publicou nos EUA o controle da qualidade total (Barros, 2001). Essa publicação influenciou as indústrias japonesas, provocando nesse país a transformação de controle estatístico em controle da qualidade total entre 1960 e 1965 (AKAO, 1997 e CHENG *et al* 1995).

Segundo Cristiano *et al.* (2000), ao contrário de outros métodos que se originaram nos EUA e foram levado ao Japão, o QFD surgiu do controle da qualidade total no Japão nos anos 60 e tem sido transferido às companhias americanas. Cheng *et al.* 1995 afirma que o QFD foi criado no Japão, principalmente por Mizuno e Akao, quando as indústrias japonesas em dificuldade, após o término da segunda guerra, faziam cópias e imitações com base no original. O método QFD surgiu como um conceito incluído ao Controle da Qualidade Total com o objetivo de desenvolver novos produtos para superar a fase de cópias e imitações que predominava no Japão (AKAO, 1997)

Historicamente, a indústria japonesa começou a formalizar os conceitos do QFD quando Sr. Oshiumi do *Kurume Mant* produziu um quadro de garantia de processo, que continha algumas das características principais do QFD, em 1966 na indústria de Pneus Bridgestone. Na qual se utilizava um diagrama de Causa e Efeito para identificar os requisitos do cliente (efeitos), as

características da qualidade e os fatores de processo (causas) necessários para o controle, visando à garantia da qualidade de produto (CHAN and WU, 2002b; MAZUR, 1999). Porém, segundo Chan and Wu, (2002b) foi Akao que percebeu o valor destes conceitos em 1969 e quis utilizá-los durante o processo de desenvolvimento de novos produtos de forma que as características dos produtos pudessem ser convertidas em pontos do Controle de Qualidade. Após várias tentativas industriais, Akao escreveu um artigo sobre este novo conceito em 1972 denominando-o de *Hinshitsu Tenkai* (Desenvolvimento da Qualidade). De acordo com os autores esta publicação de Akao, de 1972 (*New product development and quality assurance deployment system - Standardization and Quality Control*) e o artigo de Nishimura, também em, 1972 (*Ship design and quality table - Quality Control*) foram duas publicações que apresentou o novo conceito de QFD ao mundo.

Enquanto isso, nos Estaleiros Kobe das indústrias pesadas Mitsubishi começou a ocorrer a primeira aplicação sistematizada do método QFD em 1971 por sugestão de Akao, quando Shigeru Mizuno e Yasishi Furukawa desenvolveram a “casa da qualidade”, tornando-a parte do método (Akao, 1997). A partir daí Akao formulou todo o procedimento de tradução das exigências dos clientes para as fases de projeto até as fases de operações de produção o que foi chamado de *hinshitsu kino tenkai* (Desenvolvimento da Função Qualidade) (CHAN and WU, 2002b).

Em 1975 Akao aplicou o método QFD a *Hino Motors* e em 1977 Takezawa aplicou na *Toyota Auto Bod*. Estas duas empresas do grupo Toyota obtiveram resultados impressionantes, o que levou Toyota a introduzir o método em todo o grupo. (CHAN and WU, 2002b; BARROS, 2001). Conforme Akao (1997) relata a explanação do QFD internamente ao grupo empresarial teve como referência a promoção de um seminário em 1979 com a participação de cem gerentes, que trabalhavam com a garantia da qualidade, onde Takezawa abordou no evento os princípios do método e também foram apresentados os estudos dos casos da *Hino Motors* e da *Toyota Auto Bod*.

Pelas explorações descritas e pela prática, o QFD foi prosperamente usado em muitas indústrias japonesas, como nos sistemas de agricultura, equipamentos de construção, eletrodomésticos, circuitos integrados, sistemas de software, borracha sintética, e na indústria têxtil (CHAN and WU, 2002b).

### 2.2.3 Desenvolvimento do QFD nos EUA

Depois de mais de 10 anos de desenvolvimento de QFD no Japão, Kogure e Akao publicaram o artigo “*Quality Function Deployment and CQWC in Japan – A strategy for Assuring that Quality is Built Into New Products*” em outubro de 1983 na revista *Quality Progress* da *American Society Quality Control*, que é considerado o marco da entrada do QFD nos EUA. (AKAO 1997; CHAN and WU, 2002b). Silva (1996) afirma que este artigo estabelece o QFD como parte integrante do programa maior do TQC.

De um ponto de vista organizacional, a ASI (*American Supplier Institute*: <http://www.amsup.com>) e a GOAL/QPC (*Growth Opportunity Alliance of Lawrence/Quality Productivity Center*: <http://www.goalqpc.com>) fizeram um ótimo trabalho dando publicidade ao QFD nos EUA. Especialmente, por patrocinaram o simpósio anual de QFD em Novi, Michigan desde 1989, tornando as publicações deste simpósio as principais publicações em QFD (PRASAD, 1998). Em 1993, mais um instituto especializado, o *QFD Institute* (QFDI: <http://www.qfdi.org>), foi fundado como objetivo educacional. O *QFD Institute* promove pesquisas para estudos avançados em QFD. Desde então, o *US QFD Symposium* (<http://www.qfdi.org/transact.htm>) começou a ser organizado por este Instituto (CHAN and WU, 2002b).

A primeira pesquisa registrada em QFD nos EUA provavelmente será de 1986 quando Kelsey Hayes utilizou o QFD para desenvolver um sensor, que cumpria as necessidades críticas dos clientes (PRASAD, 1998). Nos EUA muitas companhias como a *3M Company*, *AT&T*, *Baxter Healthcare*, *Budd*, *Chrysler*, *DEC*, *Ford Motor*, *General Motors*, *Goodyear*, *Hewlett-Packard*, *IBM*, *ITT*, *Kodak Eastman*, *Motorola*, *NASA*, *NCR*, *Polaroid*, *Procter and Gamble*, and *Xerox* incluíram o QFD nas suas práticas industriais (AKAO 1997; CHAN and WU, 2002b). Chan and Wu, (2002b) afirmam que muitas outras companhias usaram o QFD e perceberam os seus significantes benefícios, e devido a isto a ferramenta continua crescendo em popularidade. Griffin and Hauser (1992) acreditam que o QFD é utilizado por mais de 100 das principais companhias americanas.

### 2.2.4 Desenvolvimento do QFD em outras regiões

A influência do QFD vai além do Japão e EUA. Por exemplo, já é informado aplicações de QFD e estudos em diversos ramos industriais em vários países ou regiões. (CHAN and WU, 2002b; SILVA, 2002)

Desde 1995, o *Annual International Symposium on QFD* (<http://www.icqfd.org/transact.htm>) vem sendo realizado nos EUA ou outros países. Ao término do 3º Simpósio Internacional em QFD em 1997, foi estabelecido o *International Council of QFD* (ICQFD: <http://www.icqfd.org>), uma organização não lucrativa com a presidência do Professor Akao e localizada em Michigan, EUA. O Conselho inclui representantes da União japonesa de Cientistas e Engenheiros (<http://www.juse.org.jp>), do *QFD Institute* dos EUA, da Universidade de MacQuarie da Austrália, da Universidade de Linkoping na Suécia, (<http://box.ikp.liu.se/publications/gemensamma/qfdprogm.html>), do NTQI, FCO (Fundação Cristiano Otoni), UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) do Brasil, e do *QFD Institute Deutschland* da Alemanha (Germany:<http://www.qfd-id.de>), que são todas as organizações de QFD ativas ao redor do mundo e mostram a globalização da técnica de QFD. (CHAN and WU, 2002b)

Silva (1996) afirma que no Brasil o QFD só começou a ser estudado no final da década de 80 e início dos anos 90. No Brasil, conforme relata Akao (1997), o método QFD foi primeiro introduzido em 1989 no Congresso Internacional de Controle da Qualidade (*ICQC - International Congress Quality Control*) realizado no Rio de Janeiro, e após este congresso, em 1996 houve um incremento de 50% do número de empresas, que aplicavam o QFD (CAUCHICK and CARPINETTI, 1999). Em 1999 foi realizado em Belo Horizonte o 5º Simpósio Internacional sobre QFD, que contribuiu com a disseminação e com consolidação do método no Brasil (BARROS, 2001).

Sassi and Miguel (2002) realizaram uma análise dos artigos publicados em 14 anais de eventos no Brasil de 1995 a 2001. Segundo os autores pode-se observar que a metodologia é relativamente recente, vem sendo bastante divulgado, o que pode ser comprovado pelo número de publicações de artigos nos eventos verificados nos últimos anos. A **Figura 2.2** de acordo com os autores mostra a evolução do uso do QFD no Brasil nos últimos anos, indicando o número de artigos publicados nos anais de diversos eventos.

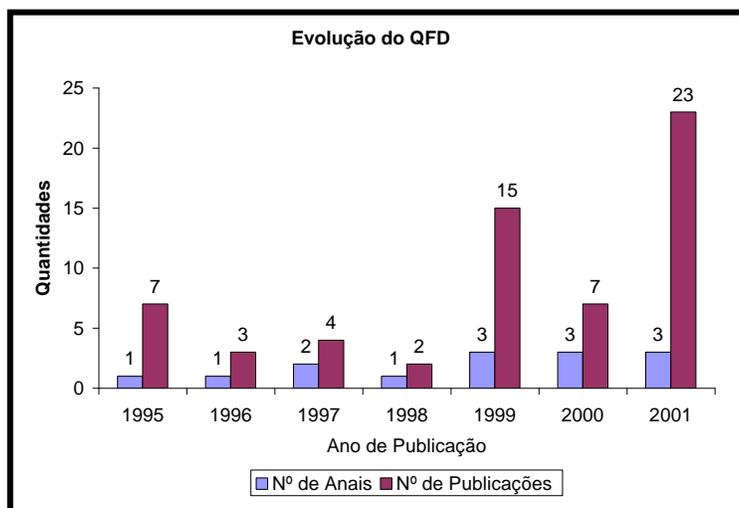


Figura 2. 2 – Evolução do QFD Brasil nos últimos anos.  
Fonte: Sassi *and* Miguel (2002)

### 2.2.5 Recursos do QFD

De acordo com Chan *and* Wu, (2002b) a popularidade do QFD também pode ser testemunhada pela quantidade de recursos disponíveis sobre o QFD. Segundo os autores isto pode facilmente ser explicado ao se observar as quatro explanações realizadas por eles. Na primeira, os autores ressaltam o vasto número de organizações que fornecem treinamento e consultorias em QFD no mundo, citando as 16 mais conhecidas. Na segunda, os autores ressaltam a vasta disponibilidade de softwares de fácil utilização pelos usuários do método QFD, citando os 10 softwares mais conhecidos. Na terceira, os autores ressaltam a vasta disponibilidade de informação on-line disponíveis sobre o método QFD, citando os 7 melhores *websites* sobre o assunto. Na quarta, os autores ressaltam a vasta disponibilidade de informação disponíveis em teses, dissertações, livros, artigos dos principais periódicos internacionais sobre o método QFD. O que segundo os autores também caracteriza a popularidade do QFD.

## 2.3 Campos Funcionais do QFD

O QFD foi originalmente proposto, para coletar e analisar a voz do cliente para o desenvolvimento de produtos com alta qualidade mas com o objetivo de encontrar ou ultrapassar as necessidades dos clientes (AKAO, 1995; CRISTIANO *et al* 2000). Portanto, inicialmente, as funções primárias do QFD segundo Chan *and* Wu, (2002b), foram: o desenvolvimento de produto, a administração de qualidade, e a análise precisa da chamada voz do cliente. Após ser percebido as suas potencialidades de aplicação pelos pesquisadores, o campo funcional do QFD

foi ampliado a campos mais extenso (SILVA, 2002). Chan *and* Wu (2002b) afirmam que não há nenhum limite definido para potenciais aplicações do QFD.

### 2.3.1 Desenvolvimento de Produto

Chan *and* Wu, (2002b), afirmam que o desenvolvimento de produtos é a mais popular das aplicações de campo do QFD. A importância do QFD no desenvolvimento de produtos é demonstrada através das suas diversas aplicações. Dentre estas aplicações, pode-se citar:

Segundo Akao (1995) em janeiro de 1994, a imprensa escrita divulgou com grande novidade o lançamento do automóvel modelo *Néon* pela *Chrysler*, com o preço na faixa de US\$ 10.000,00, para barrar a entrada dos carros japoneses. Segundo o autor a notícia veiculada nos jornais, a *Chrysler* na época chamada de *Lee Lacocca*, desenvolveu uma pesquisa completa sobre a Honda entre 87 e 88 e aproveitou o seu resultado para rever o sistema convencional de desenvolvimento de novos modelos, no qual as áreas de produção, vendas e pesquisa e desenvolvimento agiam separadamente. De acordo com o autor em função da modificação, os representantes dessas três áreas formaram um grupo e começaram a trabalhar no mesmo edifício. Como consequência, foi possível reduzir consideravelmente o tempo de desenvolvimento resultando no lançamento do Néon em 31 meses.

A empresa de alimentos Sadia recentemente necessitou comprar novos equipamentos para fabricar uma família de produtos. Para realizar esse processo de transferência de tecnologia, de modo que a empresa comprasse os equipamentos certos, ela utilizou a metodologia do QFD como guia deste processo. Com o uso do QFD foi possível definir a partir dos requisitos dos clientes que características do produto, da matéria-prima e dos processos serão necessários para atender estas exigências. Segundo Sarantopoulos *et al.* (1999), o QFD funciona lembrando sempre às empresas que quem manda é o consumidor final e a tecnologia deve atendê-lo.

Desenvolvimento de refrigeradores na Eletrônica LG, uma empresa sul coreana que confecciona equipamentos elétricos – Akao (1995) afirma que a LG iniciou a implementação do QFD em 1995 e desenvolveu seis novos modelos de refrigeradores “*Rokkakusui*” de médio porte com capacidade de 400 e 500 litros. Segundo o autor a LG, elaborou a tabela de desdobramento das Qualidades exigidas e com o uso das informações primitivas coletadas junto aos clientes, efetuou-se a suposição das cenas de utilização do produto na “folha de conversão dos dados primitivos” para construção da matriz qualidade. Através desta, foi possível identificar com precisão a necessidade dos clientes sul-coreanos quanto ao “desejo de se tomar água gelada e

saborosa a qualquer momento”. Como resultado a Eletrônica LG conseguiu desenvolver uma geladeira dotada da função “de retirar a água gelada e saudável, água esta com uma estrutura de seis moléculas, sem a necessidade de abrir a geladeira”. Os novos modelos desenvolvidos segundo Akao (1995), se tornaram produtos de sucesso da Eletrônica LG, resultando em poder caminhar para a consolidação da posição máxima no mercado ao alcançar uma fatia de mais de 30%.

### 2.3.2 Administração da Qualidade

Segundo Chan *and* Wu, (2002b) a administração da qualidade é outro campo popular de aplicações do QFD. A Administração da Qualidade é uma parte importante do processo de QFD e é essencial para a obtenção de um desenvolvimento de produto bem-sucedido, e que de acordo com os autores pode-se encontrar muitas publicações neste campo. Dentre estas aplicações pode-se citar:

Uma empresa do ramo Hoteleiro escolheu uma área piloto dentro do empreendimento para utilização do QFD integrada com o TQC (*Total Quality Control*). Para utilização do QFD, escolheu-se o restaurante por lidar com problemas característicos de várias áreas. Segundo Silveira & Seleg (1995), a primeira parte do plano realizou-se um diagnóstico detalhado. Na segunda etapa, formou-se uma estrutura de suporte à implementação do TQC e QFD dentro da organização realizou-se a educação e treinamento para homogeneizar os conceitos de Qualidade e desenvolver o papel de cada um dentro da organização. Na terceira etapa, iniciou-se as atividades de Gerenciamento da Rotina definida a função de cada célula. Foram confeccionadas as matrizes de QFD para identificação do perfil dos clientes, que freqüentam o restaurante, processos produtivos/funções, dentre outras. A utilização da metodologia QFD em paralelo com a implementação de um programa de qualidade trouxe resultados positivos tais como: rapidez no gerenciamento de processos, flexibilidade para acompanhar as mudanças do mercado, além de manter os dados de todo processo garantindo o domínio tecnológico.

Lockamy III *e* Khurana (1994), realizaram uma pesquisa com o enfoque central no estudo integrado do QFD ao TQM (*Total Quality Management*) em atividades de desenvolvimento de produtos. Os autores administraram um estudo de caso detalhado do processo QFD aplicado a dois programas de desenvolvimento de veículos diferentes dentro da *Chrysler Motors Corporation*. O estudo realizado pelos autores na Chrysler incluiu dez entrevistas semi-estruturadas com os gerentes dos dois programas de desenvolvimento, com os engenheiros de

projeto e com os engenheiros industriais, todos eles especialistas em QFD e em DFMA (Projeto para a Manufatura e Montagem). Após a realização dos estudos os autores concluíram que o QFD provê de um mecanismo para integrar a filosofia TQM ao processo de desenvolvimento de novos produtos. Uma prévia compreensão detalhada do TQM é uma condição prévia a obtenção de bons resultados na utilização do QFD. Adicionalmente, em um time multifuncional de desenvolvimento, devem ser guiados por um especialista em QFD, que de acordo com os autores deve exigir a condução do projeto pelo processo de QFD. O uso de informações provenientes dos clientes é essencial para integrar a verdadeira “voz do cliente” no projeto de novos produtos dentro do enfoque TQM. Os autores também relatam que devem ser adotadas medidas de desempenho baseadas no QFD para prover a motivação dos times multifuncionais. Mas a principal conclusão obtida foi que o uso efetivo do QFD para integrar o TQM nos resultados de desenvolvimento de novos produtos trás vantagens de estratégias de mercado, devido ao melhoramento da satisfação de cliente.

Tumelero (2000), apresenta uma aplicação do método QFD na linha produtiva de biscoitos salgados, objetivando a melhoria do produto, o aumento de vendas, a conseqüente ampliação da fatia de mercado. O autor salienta, que após a realização de uma pesquisa de mercado, elaborou-se a matriz da qualidade onde ficou evidenciado que os itens apresentados pelos clientes, se destacam: a boa aparência e o bom sabor. Entre as características da qualidade destacam-se a análise sensorial, a análise visual e o teor de umidade. Seguiu-se então a elaboração das matrizes do produto (onde foi verificado que o teor de umidade e a impureza dos componentes como as características dos componentes mais importantes), do processo (onde foram priorizados os processos de estampar, inspeção/ensaio de matéria-prima e mistura da massa reformada, paralelamente, os parâmetros de processo mais importantes foram o ponto da massa do biscoito e espessura do biscoito) e de recursos (onde foram priorizadas as funções do supervisor técnico e dos líderes de processo e com relação aos itens de infra-estruturas, priorizou-se as masseiras e as bombas dosadoras). Assim, o trabalho segue como o plano de melhoria para as características da qualidade, dos componentes do produto, dos processos de fabricação, dos recursos humanos e de infra-estrutura. Segundo o autor o estudo mostrou que o QFD é um método indicado para auxiliar a gerência no planejamento e garantia da qualidade.

Segundo Tumelero (2000) à medida que as matrizes são desdobradas, alinhadas com as demandas do cliente, o plano de melhoria surge naturalmente. As ações a serem empreendidas

envolvem atuação junto ao cliente, controle de matérias primas, controle de parâmetros do processo, investimento em equipamentos e otimização de características de qualidade. No estudo de caso realizado pelo autor, ficou evidente a necessidade de tratar o problema de forma sistêmica, uma das vantagens do QFD.

Na medida em que as ações são dirigidas pelo QFD, onde são estabelecidos critérios de priorização, obtém-se um plano de ação que possui um foco bem definido. O QFD torna claro, quais os aspectos são mais importantes ao processo e isso assegura o maior retorno possível aos esforços da equipe técnica (TUMELERO, 2000).

## 2.4 Aplicações Industriais do QFD

As primeiras duas aplicações conhecidas sobre o QFD estão na indústria da construção naval realizada por Nishimura, em 1972 e na indústria eletrônica realizada por Akao, também em 1972. De acordo com Chan *and* Wu, (2002b) pode se observar aplicações que enfocam o QFD em vários ramos industriais como a automobilística, a de serviço, eletrônica, e a de software e etc. O rápido desenvolvimento do QFD resultou em variadas aplicações nestes ramos. Eventualmente, o QFD também é aplicado ao setor de serviços públicos, bancário, saúde, educação e pesquisa. Segundo os autores pode-se afirmar que na atualidade quase não há setores industriais para o qual o QFD não tem sido aplicado.

A seguir, são apresentados alguns exemplos da utilização do QFD em alguns ramos industriais.

### 2.4.1 Indústria Automobilística

A FIAT Automóveis S.A. utilizou a metodologia do QFD, para garantir a qualidade de sua nova linha de motores (*FIRE*) que a empresa instalou no Brasil (NOGUEIRA *et al.*,1999). Segundo os autores, o QFD foi eficaz para transmitir os dados do projeto até o setor de produção, identificar os processos e componentes críticos que devem ser inspecionados, mostrar como a qualidade dos componentes do motor interfere na qualidade final do produto e servir como meio de documentação do conhecimento gerado durante o projeto de linha.

A Volkswagen do Brasil vem usando o QFD para desenvolver ônibus e caminhões. Segundo Fragoso (1999), o QFD faz parte do ciclo de desenvolvimento do produto da empresa, sendo que o primeiro e mais importante passo foi o uso do QFD, pois é através do método que a empresa entra em contato com a voz do cliente (qualidade exigida) e transforma esta voz em

características técnicas do produto. Apesar disso, segundo o autor, o QFD usado na Volkswagen fica restrito apenas à sua primeira matriz (casa da qualidade), sendo uma pequena etapa do ciclo de desenvolvimento de produto da empresa.

### **2.4.2 Indústria Eletrônica**

De acordo com Adiano (1995) o QFD foi utilizado no desenvolvimento de uma solução para limpeza de circuitos impressos na IBM. O autor afirma que o propósito do projeto era melhorar a qualidade da pasta solúvel em água utilizada em circuitos impressos. Para atender as regulamentações governamentais, a IBM converteu seu processo de limpeza para um processo aquoso. Segundo o autor essa conversão requeria a introdução de uma nova fórmula para a solução. Através de uma pesquisa com equipes de clientes internos, foram levantados os requisitos para composição da matriz da Qualidade e descobriu que a viscosidade da pasta, a temperatura e a umidade da sala eram parâmetros críticos de processo e precisavam de melhoria. Uma nova pasta então fora experimentada, com o monitoramento da viscosidade, temperatura e umidade em três níveis. Tendo como resultado a sua aprovação. Então outras pesquisa foram submetidas aos clientes. Conforme o autor salienta a conclusão mostrou um crescimento na satisfação dos clientes em diversos requerimentos e os engenheiros puderam determinar como monitorar melhor os parâmetros críticos. Ainda como resultado, a IBM obteve uma economia de matéria-prima na ordem de 15% ao ano, economia no custo do processo na ordem de 25% ao ano, maior flexibilidade na linha de trabalhos de impressão, além de outras melhorias.

### **2.4.3 Indústria de Serviços**

Um estudo de caso foi realizado em um *shopping center* por Cecin *et al.* (2001). Após a realização da pesquisa de mercado para identificar as necessidades dos lojistas, utilizando o QFD como ferramenta de organização das informações, foi também utilizado o marketing de relacionamento para verificar as melhorias. Segundo os autores, foram identificadas algumas melhorias a serem feitas tais como: o número de seguranças por acesso às dependências do *shopping*, número de seguranças internos por andar do *shopping*, promoção de treinamentos aos funcionários da administração, controle de entrada e saída de pessoas fora do horário ao público e a contratação de funcionários para segurança; entre outros. A análise dos resultados revelou uma provável deficiência dos modelos anteriores de QFD desenvolvidos para o setor de serviço. Uma delas foi a não inclusão dos princípios do marketing de relacionamento, pois as ações que visam

estreitar o relacionamento entre cliente e fornecedor não eram incorporadas no plano de ação. Sendo assim, o QFD corrigiu essa deficiência.

Um dos clubes tradicionais de Porto Alegre foi escolhido para o estudo de Ribeiro *et al.* (2001). A frequência do clube vinha diminuindo devido as novas alternativas de esporte e lazer. Para mudar esta situação, utilizou-se a metodologia do QFD, iniciando com uma pesquisa de mercado, sendo complementada através da observação do comportamento do sócio durante sua permanência no Clube e visitando clubes concorrentes. Foi utilizado as matrizes da qualidade, serviços e recursos gerando itens para melhoria e em seguida desdobramento do plano de ação. O QFD se mostrou adequado para realizações de melhoria como retenção dos sócios atuais

#### **2.4.4 Indústria da Educação e Pesquisa**

Moysés e Turrioni (2000) apresentaram em seu trabalho a utilização do QFD no planejamento da disciplina “Implantação de Qualidade em Serviços” do curso técnico de hotelaria da Escola X. A pesquisa foi realizada pelos autores através de estudo de caso efetivado em uma escola que oferece cursos nas áreas de turismo, hotelaria, gastronomia, lazer, eventos e gestão ambiental. Através de seus estudos os autores depararam com as seguintes conclusões. A metodologia QFD pode ser usada não só para o desenvolvimento de novos produtos ou serviços, mas também para que as pessoas conheçam melhor o setor e a organização em que trabalham. Conhecendo os clientes, a estrutura física, os equipamentos e materiais, os processos realmente importantes e as necessidades de treinamento, arestas são aparadas e problemas são prevenidos. Moysés e Turrioni (2000) também afirmam que a metodologia QFD foi aplicada numa organização de prestação de serviço. Observou-se na aplicação que o modelo teórico proposto por Cheng *et al.* (1995) se mostrou adequado, pois possibilitou a definição de procedimentos que eram críticos para o sucesso das atividades estudadas. Os autores observaram nas aplicações que o modelo conceitual proposto não permitia (de maneira exclusiva) a detecção de necessidades de capacitação do pessoal.

#### **2.4.5 Indústria de Transporte**

A empresa de Transportes Rápido Pajuçara Ltda. é uma empresa que atua no transporte rodoviário de carga no segmento de encomendas. Segundo Bastidas *et al.* (2001), para adquirir dados confiáveis sobre os clientes, realizou-se uma pesquisa de mercado através de um questionário, identificando assim os itens, que não satisfazem as necessidades, fortalecendo o

posicionamento competitivo. O QFD permitiu a identificação dos itens de maior importância como prazo de entrega, facilitando o entendimento dos aspectos envolvidos na prestação do serviço de transporte de carga. O QFD demonstrou-se útil para determinar as discrepâncias entre o serviço esperado e o serviço oferecido.

#### **2.4.6 Indústria de Alimentos**

Paiva *and* Cheng (2001) realizaram um estudo de caso em uma empresa de massas alimentícias, devido a dificuldade na área administrativa e financeira, no processo de tomada de decisões, no controle e planejamento de suas atividades administrativas e de produção. Realizou-se pesquisa de mercado (degustação do produto), verificando alguns benefícios com a implantação do QFD tais como: organização do trabalho, infra-estrutura necessária ao processo, disponibilização e difusão das informações, conhecimento de novas técnicas, gestão da qualidade, limitações financeiras e técnicas, dentre outros. Segundo os autores, verificou-se em empresas de pequeno porte, para que o método seja eficaz, a necessidade de buscar mecanismos de suporte às atividades de marketing para avaliação de possíveis mercados e detecção das necessidades dos consumidores.

#### **2.4.7 Outras Indústrias**

Para caracterizar e mensurar a qualidade do serviço ambulatorial de Fisioterapia em um Hospital de Guaranição, propondo melhorias para o aprimoramento da qualidade do serviço de Fisioterapia de um Hospital Militar, Cortez Neto *et al.* (2001) utilizaram os itens de especificações técnicas e ações administrativas para melhorar a qualidade (denominados de indicadores de desempenho do QFD). Os critérios de qualidade selecionados pelos autores foram: relacionamento do fisioterapeuta, capacidade resolução, relacionamento com a equipe geral, equipamentos disponíveis, competência, horário, espaço físico, presença do supervisor e avaliação diária. Segundo Cortez Neto *et al.* (2001), o serviço de Fisioterapia do hospital, sob visão do cliente externo mostrou-se satisfatório. Sob o ponto dos clientes internos merece algumas melhorias no ambiente físico, disponibilidade de recursos tecnológicos, aproveitamento geral teórico e geral do tempo.

Jesus *et al.* (2001) desenvolveu em uma empresa, que opera no setor de assistência técnica no mercado de automação bancária, sendo o estudo de caso na Supervisão Regional Sul, com intuito de avaliar a sua qualidade na prestação de serviços. Os autores utilizaram a Matriz da

Qualidade, Matriz dos Serviços, Matriz dos Recursos. A metodologia do QFD de acordo com o autor forneceu subsídios para a identificação do perfil desejado de uma empresa prestadora de serviços de assistência técnica no mercado de automação, a partir do ponto de vista de seus clientes. Portanto, com a aplicação do QFD o autor verificou uma mudança de comportamento da empresa, passando de reativa para pró-ativa, baseando sua decisão em dados e fatos e também com a ampliação da satisfação de clientes.

Ferreira *and* Ribeiro (1995) apresentam a realização do projeto na Biblioteca da Escola de Engenharia de UFRGS, optando pelo uso do QFD para elaboração e implantação desse projeto. Os autores realizaram uma pesquisa de mercado através da utilização de um questionário aberto, junto aos usuários da biblioteca. Baseado nas respostas obtidas nesse questionário aberto os autores organizaram um questionário fechado, com perguntas em relação a infra-estrutura, inovações, acervo, horário de funcionamento. De acordo com os autores o QFD direcionou e facilitou a definição das etapas a serem cumpridas de forma a alcançar patamares de qualidade compatíveis com os anseios dos usuários da biblioteca, através do levantamento da voz do cliente, sendo assim criou-se um ambiente favorável ao início das atividades de análise da situação atual da biblioteca e subsequente elaboração de um projeto de modernização.

Santiago *et al* (2000) afirma que o método QFD auxiliou a atividade de projeto de páginas de Internet. Por meio da pesquisa, o autor constatou que o método utilizado pode atuar como elemento que ajuda a equilibrar o uso de recursos visuais capazes de atrair a atenção do usuário e, ao mesmo tempo, tornar as páginas de Internet mais fáceis de entender e utilizar. Segundo o autor, o QFD permitiu à equipe do projeto interagir melhor com os usuários/clientes, dado que a pesquisa em dados secundários e as entrevistas permitiram definir melhor a estratégia da pesquisa.

## **2.5 Desenvolvimento Metodológico do QFD**

De acordo com Temponi *et al* (1999), a base do QFD é a convicção que se deve projetar produtos para refletir os desejos dos clientes que normalmente são descritos em idioma natural ao projeto. Porém, os autores salientam que a falta de precisão na interpretação da semântica destas exigências torna difícil determinar a utilização do método que satisfaz as necessidades dos seus clientes. Os autores ainda salientam que as exigências dos clientes ainda são capturadas e processadas através de métodos qualitativos e quantitativos tradicionais. Os autores afirmam que

dados qualitativos são vagos e imprecisos e em natureza são utilizados pelos peritos em QFD, para avaliar os resultados de dados quantitativos. Portanto, muitos trabalhos retratam a possibilidade de integração entre o QFD e outras técnicas, que segundo os autores, possuem o objetivo de trazer apóio necessário a equipe, para que se consiga satisfazer as necessidades dos clientes.

Segundo Cristiano *et al.* (2000), nos Estados Unidos e no Japão tornou-se popular, o uso de técnicas recentemente desenvolvidas para analisar as informações provenientes dos clientes, com a finalidade de transformá-las em informações confiáveis para a aplicação do método QFD. E de acordo com Chan *and* Wu, (2002b), recentemente, muitas metodologias estão sendo adaptadas e aplicadas ao QFD para torná-lo mais rigoroso e operacional, este fato segundo Cristiano *et al.* (2000), é devido a popularização e ao amadurecimento do método QFD.

As publicações sobre o método QFD nos Estados Unidos e no Japão conforme salienta Cristiano *et al.* (2000), tem alterado o seu enfoque para a integração de ferramentas analíticas na metodologia QFD, particularmente na matriz de Planejamento de Produto. O que também é verificado por Chan *and* Wu, (2002b), que afirmam que existem muitas publicações sendo desenvolvidos com este escopo. Porém, os resultados da pesquisa desenvolvida por Cristiano *et al.* (2000) em empresas americanas e japonesas, mostra que estas técnicas analíticas relativamente complexas são muito pouco utilizadas pelas companhias (cerca de 20% dos respondentes). Os métodos mais utilizados pelas companhias, informados na pesquisa de Cristiano *et al.* (2000), foram: simulação (19,4% no Japão e 14,9% nos E.U.A); Projeto e análise de experimentos – DOE (10,5% no Japão e 13,5% nos E.U.A); regressão (10,3% no Japão e 14,9% nos E.U.A), modelos de programação matemática (10,3% no Japão e 14,4% nos E.U.A) e AHP (5,3% no Japão e 8,0% nos E.U.A).

De acordo com Chan *and* Wu, (2002b), existem vários métodos quantitativos, que podem ser utilizados no QFD para melhorar sua confiança e objetividade, notavelmente destacam-se: os da ciência da administração (benchmarking, grupo de decisão, técnicas de pesquisas de marketing), pesquisa operacional (programação linear, modelos de programação matemática), métodos de lógica difusa (AHP) e estatística (análise de regressão, método Taguchi, DOE). A **figura 2.3** salienta esta afirmação dos autores sobre a utilização de outras metodologia aplicadas ao QFD.



Figura 2. 3- Métodos que podem ser integrados ao QFD

Fonte: Chan *and* Wu, (2002b)

Outros autores como Breyfogle (2000), Oliveira *et al.* (2000), Prates (2000), Ross (1998); Silva (2002), Sriraman *et al.* (1990) e Vasconcelos *et al.* (2003b), apresentam propostas de integração do QFD com técnicas estatísticas de acordo com os objetivos apresentados neste trabalho.

Para Oliveira *et al.* (2000), o QFD é o melhor método para processar, transmitir e armazenar as informações sobre os diversos aspectos do produto, tornando-as visíveis para todos. Para tornar o processo de desenvolvimento de produto eficiente é fundamental que os dados que alimentam todo o processo de desenvolvimento sejam adequados e confiáveis. Muitas vezes a informação contida nos dados pode ser extraída com a sua disposição em forma de gráficos ou cálculo de medidas. No entanto, os dados muitas vezes exigem técnicas mais elaboradas para a extração das informações mais relevantes.

O que se observa é que a reconhecida eficiência visual do QFD começa a ser incrementada pela utilização integrada de outras técnicas. Este aperfeiçoamento provoca a sua otimização e a universalidade, elevando, com o tempo, a sua relevância em todos os campos da ciência. A seguir serão apresentadas algumas aplicações do método QFD onde podem ser observadas as potencialidades de sua integração com outras técnicas na sua confecção ou complementação.

Ribeiro *and* Ten Caten (1999) apresentam uma aplicação do QFD como ferramenta para a implantação de um procedimento inovador para o controle e garantia da qualidade em situações onde existem vários atributos e variáveis a serem monitorados. O procedimento proposto foi

chamado pelos autores de *Controle Integrado de Processos*, começa com a definição de alguns postos de controle na linha de produção, onde o monitoramento foi feito através de uma única carta de controle, que agregava vários atributos e variáveis. Segundo os autores, o uso das matrizes do QFD foi fundamental na implantação do Controle Integrado de Processos, pois permitiu identificar as variáveis e atributos que são críticos, segundo a opinião do cliente e os processos nos quais essas características de qualidade são construídas. Com a utilização do método QFD a definição do número de postos de controle, sua localização na linha de produção, a identificação das variáveis e atributos a serem monitorados em cada posto de controle ficaram facilitadas. As cartas de controle integradas, usadas pelos autores nos postos de controle, foram complementadas usando os Gráficos de Pareto que hierarquizaram as características de qualidade. Contribuíram mais fortemente para o percentual de defeituosos do posto e as cartas de controle tradicionais que são utilizadas, seletivamente, apenas conforme a indicação dos Gráficos de Pareto. A utilização conjunta dessas ferramentas auxiliou os autores no diagnóstico e na solução dos problemas de qualidade, permitindo que as ações de melhoria acontecessem no tempo e local certo.

De acordo com Vasconcelos *et al.* (2003a) desde o começo, o primeiro sistema para comunicação móvel procurava fornecer uma boa comunicação para o cliente. Porém, a definição do termo “boa comunicação” deve estar bem definida, assim será possível quantificá-la em requisitos que serão observados no projeto de um sistema para comunicação móvel. Portanto, o estudo realizado pelos autores pretende prover uma abordagem metodológica, que combina o QFD e a simulação para projeto de sistemas de comunicação móvel. Utilizando o QFD, segundo os autores, foi possível quantificar as exigências do cliente em atributos e variáveis que podem ser consideradas no projeto. Após serem quantificados os requisitos dos clientes em variáveis e atributos, o próximo passo realizado pelos autores consistiu em manipular, combinar e experimentar estas variáveis. Portanto, foi utilizada a simulação, pois esta de acordo com os autores é um dos caminhos mais utilizados para experimentar e testar o sistema, sem afetar o sistema real.

Os autores realizarão uma aplicação em um modelo teórico para demonstrar o uso da abordagem metodológica proposta. Segundo os autores essa abordagem conseguiu, de forma bastante ampla, auxiliar no projeto e/ou análise de sistema de telefonia móvel. Pois até então, o processo possuía certas barreiras para fornecer ao cliente um serviço que atendesse às suas

necessidades. Essas que até então eram difícil de quantificar, se não for utilizada uma ferramenta, tal como o QFD, largamente difundida. A simulação permite que o sistema seja experimentado e analisado, sem interferir no sistema real, diminuindo ou acrescentando canais, o que possibilita maior tráfego de sinais e melhor comunicação. Além disso, com a simulação, o projetista pode dimensionar a célula, de acordo com um determinado número de móveis ou até mesmo antecipando-se aos problemas, já delineando estratégias, caso o número crítico de móveis no sistema esteja sendo atingido. Deste modo, segundo os autores pode-se diminuir os custos com o rearranjo do sistema e prever possíveis falhas. Pode-se, enfim, verificar que esta abordagem metodológica é capaz de direcionar o projeto e/ou análise de sistema de telefonia móvel totalmente para o cliente, o que é vital para as empresas de serviços dos dias atuais.

Temponi *et al.* (1999), desenvolveram uma extensão para a Casa da Qualidade baseado na metodologia *fuzzy-logic*, com a função de capturar as exigências dos clientes com maior precisão, representando as exigências de uma maneira mais formal. De acordo com os autores, a proposta da utilização do método *fuzzy-logic* também possui o objetivo de facilitar a comunicação de membros do projeto. Baseado nestes objetivos, os autores desenvolveram um esquema de conclusão heurístico para argumentar sobre as relações implícitas entre as exigências dos clientes. Os autores ilustraram seus estudos utilizando uma aplicação empresarial no setor têxtil.

A proposta apresentada é baseada nas seguintes afirmações dos autores que dizem que apesar do número significativo de sucessos documentados com o uso da Casa da Qualidade, há algumas companhias que falharam neste processo. Os autores salientam que entre os problemas mais significantes identificados com o uso da Casa da Qualidade forem: (i) tempo consumindo, (ii) o tamanho das matrizes, (iii) a dificuldade em alcançar acordo entre os conflitos encontrados nas exigências técnicas, e (iv) a dificuldade de traduzir e categorizar as necessidades dos clientes como também priorizar exigências dos clientes. Portanto, os autores estipularam como objetivo principal a simplificação da comunicação para todos os participantes do QFD com o uso da ferramenta de análise proposta.

Para a obtenção do objetivo, os autores selecionarão o método *fuzzy-logic*, como um meio para representar uma metodologia de apoio ao QFD. Na aproximação, os autores utilizaram o método *fuzzy-logic*, para capturar as exigências do cliente explicitamente. Fazendo-se com que a comunicação entre clientes e engenheiros, tenha uma representação formal e quantitativa das exigências dos clientes. Baseado nesta representação, os autores identificaram as relações mais

importantes, como por exemplo, as relações contraditórias entre duas exigências. Além disso, foi desenvolvido um esquema de conclusão heurístico para argumentar sobre as relações implícitas entre as exigências técnicas baseando-se nas relações identificadas entre os clientes e as exigências técnicas. Segundo os autores o benefício do método desenvolvido foi na ajuda aos participantes para entender os significados e implicações das exigências dos outros parceiros de equipe. O método ajudou os companheiros de equipe a identificar exigências contraditórias, e facilitou uma comunicação mais efetiva e fazendo com que a decisão estratégica empresarial envolva todos os participantes em uma equipe de QFD.

O trabalho de Oliveira *et al.* (2000) apresenta uma proposta de integração do método QFD e de técnicas estatísticas de planejamento e análise de experimentos, visando à melhoria dos resultados obtidos no desenvolvimento de produtos, em especial na etapa do projeto do produto e do processo. A proposta foi aplicada em uma empresa do setor alimentício, que enfrentava dificuldades no desenvolvimento de um determinado produto, principalmente à obtenção de informações. Alguns benefícios observados pelos autores com a implantação do QFD foram: maior confiança da equipe nos resultados obtidos e nas decisões tomadas, alcance das metas de prazo e de qualidade do projeto, maior interação entre as áreas de P&D e *Marketing*, maior extração de informações das pesquisas de mercado, dentre outros.

Vieira *and* Stange (1996) apresentam uma variação do QFD proposto por Macabe com uma matriz a mais sobre assistência técnica e com o uso Método de Taguchi para complementar o QFD, sendo este método segundo os autores, adaptado para o uso nas montadoras do Brasil. O estudo de caso foi realizado na empresa Agrale S/A, no sistema de freios do caminhão Agrale 4000D, buscando a redução do número de reclamações a garantia da qualidade do produto desde o projeto até a utilização final pelo cliente. O QFD se mostrou útil para identificar os itens importantes, focando o campo de aplicação das ferramentas de melhoria como o Método de Taguchi e o CEP (Controle Estatístico do Processo). O uso do Método de Taguchi apresentou a vantagem de dar resultados em curto prazo, motivando a empresa a continuar o projeto antes mesmo do aparecimento dos primeiros resultados do QFD. A participação da assistência técnica contribuiu tanto para coletar a qualidade exigida do cliente como também para conscientização dos funcionários deste setor sobre o produto e as exigências dos clientes.

Segundo Vasconcelos *et al.* (2003b) o objetivo de seu artigo foi demonstrar que o uso do Projeto e Análise de Experimentos (DOE), pode aumentar a eficácia das atividades de

planejamento da qualidade, ao estabelecer critérios menos arbitrários na construção de matrizes QFD. Outro objetivo definido pelos autores foi o de apresentar uma abordagem metodológica para a determinação das melhores características de projeto ou processo – que foi denominado de Valores Objetivos - para a matriz QFD. Para a consecução desses objetivos foi estudado um exemplo prático, clássico e didático, adaptado de Box *et al* (1991), relacionado com a construção de um helicóptero de papel. Tal exemplo tem sido muito referenciado no ensino de DOE e da metodologia Seis Sigma por sua simplicidade e riqueza de idéias (Breyfogle, 2000).

Após a aplicação da metodologia os autores concluíram que o QFD é uma ferramenta visual muito eficiente, mas tem, intrinsecamente, algumas deficiências relativas à definição dos valores objetivos de suas matrizes. Inúmeras possibilidades são vislumbradas pelos pesquisadores no sentido de potencializar as qualidades deste método de planejamento da qualidade, que procura traduzir a expectativa do cliente a respeito do produto em informações a serem quantificadas e controladas durante a fase de projeto dos novos produtos, sincronizando atributos técnicos do projeto com dimensões da qualidade. Os autores afirmam que o QFD é uma ferramenta que comporta muito bem uma integração com o DOE. O trabalho procurou demonstrar essa integração, utilizando um exemplo acadêmico clássico, que pode ser facilmente assimilado e reproduzido. Segundo os autores, os resultados mostraram que as definições subjetivas da Matriz QFD foram antagônicas aos resultados estatísticos obtidos usando o DOE. De acordo com os autores generalizando-se tais procedimentos, torna-se possível eliminar interpretações subjetivas a respeito dos requisitos dos clientes, ao desenvolver novos produtos. A abordagem metodológica apresentada propõe uma nova perspectiva para a análise de novos produtos, utilizando-se a experimentação e os requisitos dos clientes como principais ferramentas. Deste modo, o QFD consegue direcionar os esforços para a melhoria da qualidade de projeto de produtos, processos e serviços, obtendo-se resultados mais precisos e atendendo as necessidades dos clientes.

Srlraman *et al.* (1990) apresenta uma metodologia associada ao QFD, utilizando o DOE e o método Taguchi para poder identificar quais características do produto ou processo estão diretamente ligados às exigências do cliente. De acordo com os autores o DOE e/ou métodos Taguchi, podem ajudar identificar quais características ou requisitos de produto ou relações de processo são verdadeiramente influentes, determinando quais as suas forças relativas e qual a natureza de sua relação com as necessidades ou requisitos dos clientes. Para implementar estas

duas técnicas de controle de qualidade, os autores salientam a importância da utilização de informações bem organizadas, tendo-se com escopo de assegurar que as exigências dos clientes sejam totalmente conhecidas. Tornando-se algo importante para o desempenho do QFD e DOE. Para este estudo, os autores utilizaram uma matriz da qualidade para um sistema de combustível. Após a construção da matriz os autores determinaram como as variáveis de processo deveriam ser mudadas para adequá-las as necessidades dos clientes. Isto foi realizado utilizando o DOE. Porém, as Técnicas de Taguchi são, de acordo com os autores, aplicáveis ao projeto de produto e de processo. Pois fatores ambientais como temperatura, umidade etc., afetam o desempenho do produto. A filosofia de Taguchi projeta parâmetros que farão com que o produto seja insensível ou resistente para estes fatores ambientais. Os autores afirmam que o objetivo inicial foi alcançado, pois o através do método DOE pode-se relacionar a voz do cliente para as exigências de produção com uma maior confiabilidade estatística.

## 2.6 As Diferentes Abordagens do QFD

Segundo Cheng *et al* (1995), há uma pequena confusão no entendimento do que seja verdadeiramente o QFD. A confusão parece acontecer, segundo o autor, em dois aspectos: nas distintas denominações e nas diferentes abordagens.

Nos EUA e na Europa o QFD é um método conhecido e utilizado, contudo nestas regiões o método é restrito ao Desdobramento da Qualidade – QD. No Japão, o QFD é subdividido em QD e QFD<sub>r</sub>, sendo estendido de uma forma mais ampla, algo ligado ao planejamento da qualidade e ao sistema de garantia da qualidade. Portanto, a confusão está em atribuir o nome QFD a conteúdos distintos (CHENG *et al* 1995).

O autor apresenta o QFD como um processo sistemático de desdobramento do trabalho da ação gerencial de planejamento da qualidade (gestão do desenvolvimento do Produto) em procedimentos gerenciais e técnicos para serem cumpridos pelas áreas funcionais da empresa, tendo como objetivo especificar quais funções ou trabalho humano são necessários para obtenção da qualidade do produto e da empresa, que satisfaçam as necessidades dos clientes. O autor ainda salienta que se no QD efetua-se o desdobramento da qualidade, no QFD<sub>r</sub> é feito o desdobramento do trabalho.

Quanto ao aspecto abordagem Silva, (1996) afirma que existe três grandes abordagens da metodologia QFD, duas versões distintas adotadas por duas instituições americanas diferentes

(Goal/QPC e a ASI) que contemplam apenas o QD e uma abordagem japonesa que também considera o QD além do QFD<sub>r</sub> conforme salienta Cheng *et al* (1995).

Silva (1996) afirma que as três abordagens apresentam o mesmo método de desdobramento, baseado na comparação de dois grupos de itens para identificar os elementos que se relacionam e a intensidade desta relação e para hierarquizar os elementos conforme critérios pré-estabelecidos. Segundo o autor as abordagens diferenciam entre si nos seguintes aspectos:

- Nas etapas propostas para a execução dos desdobramentos, sendo mais ou menos abrangentes de acordo Cheng *et al* (1995);
- No número de matrizes utilizadas para cada uma das etapas;
- No uso de ferramentas auxiliares.

Em síntese, a diferenciação básica das abordagens está no modelo conceitual desenvolvido em cada uma delas. Silva (1996) afirma que o modelo conceitual representa o caminho que o estudo deve percorrer para alcançar o objetivo desejado, sendo um plano de trabalho que direciona todo o processo de desdobramento.

### 2.6.1 Abordagem de Akao

Segundo Silva (1996) a abordagem de Akao é bastante abrangente e contempla quatro perspectivas distintas de desdobramento. Definidas por Akao (1995) e Cheng *et al* (1995) e Cristiano *et al* (2000) como as quatro dimensões de desdobramento: Desdobramento da Qualidade, da Tecnologia, do custo e da confiabilidade. As fases do modelo podem ser visualizadas no esquema da *figura 2.4*.

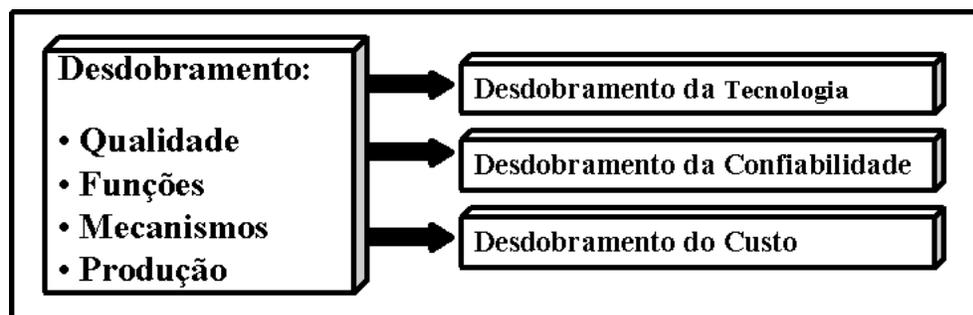


Figura 2. 4 - Fases do modelo de Akao

Fonte: Silva, (1996)

Silva (1996) sugere a utilização destes quatro desdobramentos para um estudo mais abrangente e completo sobre um dado tema. Entretanto Silva (1996), Akao (1995) e Cheng *et al*

(1995) e Cristiano *et al* (2000) salientam que a decisão de quais dimensões do desdobramento serão contempladas ou não, num determinado desenvolvimento, é dependente das metas do projeto. Portanto, de acordo com Cheng *et al.* (1995) e Silva (1996), pode-se dizer que o tipo de modelo conceitual a ser construído depende das metas, do tipo da empresa, da natureza do produto e da proximidade aos clientes. Cristiano *et al.* (2000) ainda afirma que os projetistas de novos produtos devem possuir habilidade para costurar um jogo de relações, que determinaram o modelo específico de QFD apropriado para examinar a sua aplicação. Silva (1996) ainda salienta que quatro fases de desdobramento não implicam em quatro matrizes. Akao (1995) afirma que para cada um dos desdobramentos deve-se utilizar uma série de matrizes, que são utilizadas conforme os parâmetros desejados.

Akao (1995) sugere a composição de um sistema estruturado para gerenciar o desenvolvimento de produtos e serviços com enfoque voltado para as necessidades do consumidor. Segundo o autor para concretizar esta composição deve-se utilizar para a execução das matrizes técnicas como: Engenharia de valor, Projeto de experimentos (DOE), Metodologia Taguchi, FTA (Análise de Árvore de Falhas) e FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falhas)

### **2.6.2 Abordagem de Bob King**

Esta abordagem americana é difundida pelo Goal/QPC e de acordo com Cheng *et al.* (1995) teve origem nos trabalhos de Akao. Segundo o autor, a abordagem de Bob King apenas contempla o QD e se caracteriza pelo desdobramento sistemático das matrizes ao invés de tabelas. Silva (1996) salienta que Bob King organizou o sistema de Akao, agrupando as matrizes em uma única chamada Matriz das Matrizes, procurando esquematizar os desdobramentos de maneira mais ordenada (padronizado). Por último, conforme o autor salienta esta abordagem inclui também um novo conceito de Método de Seleção, do escocês Pugh, que assegura a introdução do ingrediente inovação no processo de QFD. O autor afirma que nesta abordagem são dispostas trinta matrizes. Analogamente Silva (2002) afirma que a “Matriz das Matrizes” criada por Bob King em 1989, procura esquematizar os desdobramentos de maneira mais ordenada, como em uma receita de bolo, reorganizando o sistema de maneira a obter as matrizes em uma única Matriz das Matrizes.

Segundo Silva (1996), esta abordagem sugere para cada objetivo específico, uma seqüência diferente de utilização das matrizes. O autor ainda afirma que para cada objetivo, como

custo, confiabilidade, inovação, métodos de manufatura e outros, segue-se o mesmo procedimento. Para cada, uma das fases também são indicadas às ferramentas de apoio mais apropriadas.

### 2.6.3 Abordagem do Modelo de Quatro Fases

De acordo com Cheng *et al* (1996), Cristiano *et al* (2000) e Silva (1996), existe nos EUA mais uma abordagem para o QFD centrado no processo de Quatro Fases, popularizado pelo *American Supplier Institute* (ASI). Cheng *et al.* (1996) e Silva (1996), afirmam que esta abordagem teve sua origem na pessoa de Macabe, que ensinou o método para a Fuji e para a Xerox através de Don Clausing que introduziu o modelo na ASI. Esta abordagem também pode ser denominada como Abordagem de Macabe e segundo Silva (1996), seu método é o mais difundido devido a sua simplicidade. Porém, conforme Cheng *et al.* (1996) esta abordagem inclui somente o QD de acordo com a divisão do Professor Akao. Cheng *et al.* (1996) assegura que esta abordagem é certamente uma versão simplificada, a qual as melhorias e avanços da prática do método QFD não foram integralmente incorporados. Conforme Silva (1996) no Brasil este é o método, que tem recebido o maior número de adeptos, talvez, devido a facilidade de acesso a bibliografias americanas. Conforme Temponi *et al.* (1999) as quatro fases desta abordagem se constituem em quatro matrizes, que direcionam o desenvolvimento do produto ou serviço, desde os requisitos dos consumidores até a fabricação.

O modelo de quatro fases divide o processo de desenvolvimento de produtos em quatro fases usando quatro matrizes. Na primeira fase são coletados os Requisitos dos clientes (ou Necessidades dos clientes, Atributos dos clientes, Qualidade exigida pelos clientes) que são chamadas de “Os Quês (*Whats*)”. Após a coleta dos “Os Quês” os mesmos são transformados nos Requisitos de Projeto (ou Necessidades técnica, Especificações de projeto, Características da Qualidade, Características de Engenharia) chamados de “Comos (*HOWs*)”. Esta fase é fundamental para o processo de desenvolvimento de produtos e, freqüentemente é chamada de a “Casa de Qualidade (*House of Quality* - HOQ)”. Nesta primeira fase, as necessidades dos clientes, que na maioria das vezes são informações qualitativas são traduzidas ao projeto independente, se os Requisitos de Projeto do produto são mensuráveis ou não. Os Requisitos de Projeto são priorizados através da perspectiva do cliente e seus valores objetivos (ou especificações preliminares) são selecionados para o nível desejado de desempenho, sendo

baseados em benchmarking competitivo (CHAN *and* WU, 2002; CRISTIANO *et al* ,2000 e TEMPONI *et al* 1999).

A segunda fase transforma e prioriza os requisitos de projeto da primeira fase nas características das Partes, sendo chamada de Desdobramento dos Componentes. Na fase 2 examina-se a relação entre os requisitos de projeto e os vários componentes ou partes do projeto. O resultado de Fase 2 é uma priorização dos componentes, separando os mesmos em função do seu nível de destaque no projeto (CHAN *and* WU 2002A; CRISTIANO *et al* ,2000). Cristiano *et al* (2000) afirmam que esta fase permite desenvolver habilidades para conhecer a qualidade desejada num nível de desempenho característico.

Após serem desdobrados alguns componentes ou partes importantes do projeto, os mesmos são explorados na Fase 3 na relação estabelecida entre as parte e os processos industriais. O objetivo da Fase 3 é identificar as operações industriais, que controlam e possuem maiores influências sobre o projeto e também determinar quais as especificações e as variações dos componentes do processo. O resultado de Fase 3 é uma priorização dos processos industriais e as especificações dos parâmetros de processos que posteriormente são desdobrados em uma quarta fase. Esta terceira fase pode ser chamada de Planejamento do Processo (BURKE, 2002; CHAN *and* WU, 2002; CRISTIANO *et al* ,2000).

Na Fase 4, os processos industriais chaves e os parâmetros associados são traduzidos em instruções de trabalho, controle, e treinamentos necessários para assegurar que as exigências da qualidade das partes chaves e dos processos sejam mantidas. Esta quarta fase pode ser chamada de Planejamento da Produção. Idealmente, estas quatro fases combinadas provêm um vínculo entre as exigências dos clientes e o projeto de novos produtos com o intuito da obtenção da satisfação clientes (BURKE, 2002; CHAN *and* WU, 2002; CRISTIANO *et al* ,2000).

Silva (1996), afirma que apesar de sua grande aceitação junto às empresas, esta abordagem tem sido muito criticada pelos estudiosos japoneses devido à sua limitação, pois como o modelo é reduzido a apenas quatro matrizes, permitem somente uma análise superficial da empresa ou objeto de estudo sem considerar as peculiaridades de cada caso como tipo de produto ou serviço, o mercado em que está inserida, a condição de concorrência. Além disso, o método não contempla objetivos mais específicos como desdobramento de custo de confiabilidade. Esta abordagem desenvolvida por Macabe pode ser visualizada na **figura 2.5**.

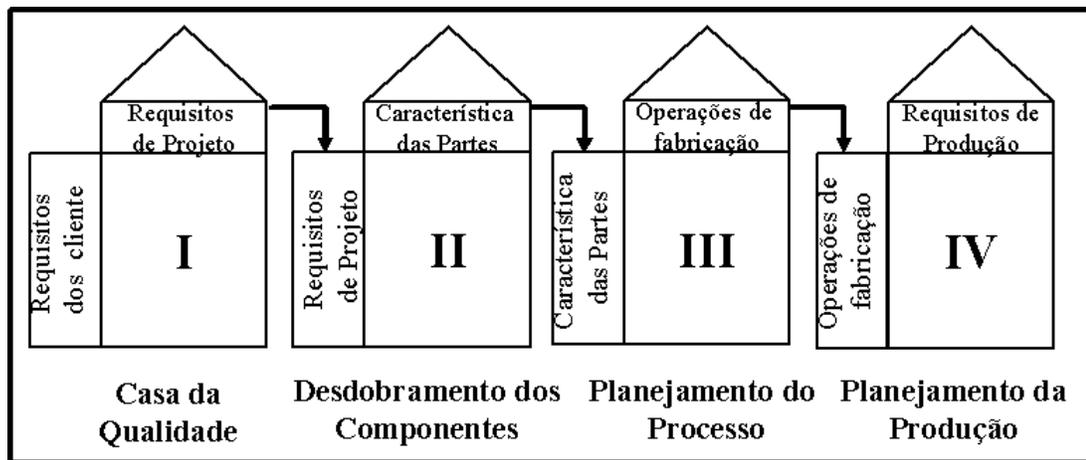


Figura 2. 5 – O Modelo de quatro fases do QFD

Fonte: Chan *and* Wu, (2002a), Cristiano *et al* (2000) e Vairaktarakis (1999)

## 2.7 Casa da Qualidade: Conceitos e Métodos

Conforme Temponi *et al.* (1999) a Casa da Qualidade (HOQ) é uma das matrizes de um processo iterativo chamado de Desenvolvimento de Função de Qualidade (QFD). Segundo os autores a fundação da Casa da Qualidade deve ser a convicção que se devem projetar produtos que reflitam os desejos e os gostos dos clientes.

Silva (2002) afirma que a Casa da Qualidade é uma matriz que relaciona os requisitos dos clientes, com as características ou especificações de projeto, que sejam mensuráveis, necessárias para satisfazer os requisitos dos clientes. E conforme salienta Akao (1995) e Tumelero (2000), a casa da qualidade possui a finalidade de auxiliar no projeto da qualidade, sistematizando as qualidades verdadeiramente exigidas pelos clientes, por meio de expressões lingüísticas, mostrando a correlação entre essas expressões e as características da qualidade, e convertendo as qualidades exigidas pelos clientes em características subjetivas.

De acordo com Chan *and* Wu, 2002a, uma matriz Casa da Qualidade compreende seis partes que são demonstradas na *figura 2.6*, que representa uma ilustração esquemática de uma matriz QFD.

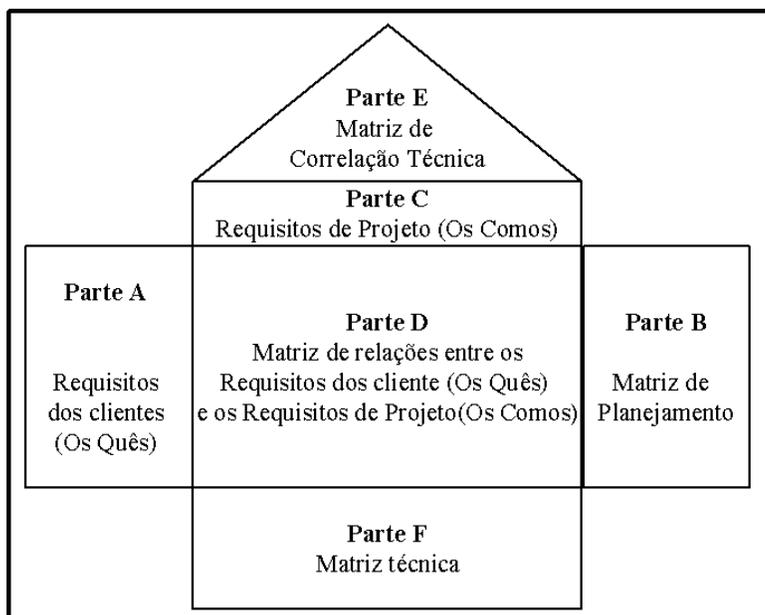


Figura 2. 6 – Casa da Qualidade: Descrição Resumida

Fonte: Akao (1995); Burke (2002); Chan *and* Wu, (2002a) e Cheng *et al* (2000).

A primeira parte da Casa da qualidade (Parte A) contém a lista dos requisitos dos clientes, juntamente com seu planejamento para cada requisito representado pela matriz de planejamento que se encontra na parte B. A parte superior da Casa da Qualidade contém os chamados requisitos ou características de projeto (parte C) necessárias para atender os requisitos dos clientes. Para cada requisito deve-se relacionar a pelo menos uma característica de projeto correspondente. Isto pode ser observado na parte central da matriz Casa da Qualidade (Parte C) que é formada por um grupo de células, que indicam a correlação entre os requisitos dos clientes e os requisitos de projeto. Sendo utilizados símbolos ou valores para ponderar esta correlação. O telhado da matriz Casa da Qualidade (Parte E) representa a correlação estabelecida entre os requisitos de projeto, onde também são utilizados símbolos ou valores para ponderar a correlação entre esses requisitos. A parte de baixo denominada Matriz técnica da matriz Qualidade (Parte F), é formada pelos valores-meta, ou seja, pelas medidas “quanto” relativas aos requisitos de projeto, citados anteriormente. Sendo estes valores determinados pela equipe multifuncional e devem ser preferencialmente mensuráveis de forma a verificar se os objetivos foram atendidos.

A *figura 2.7* apresenta uma representação esquemática detalhada de todas as partes de uma matriz QFD apresentadas anteriormente.

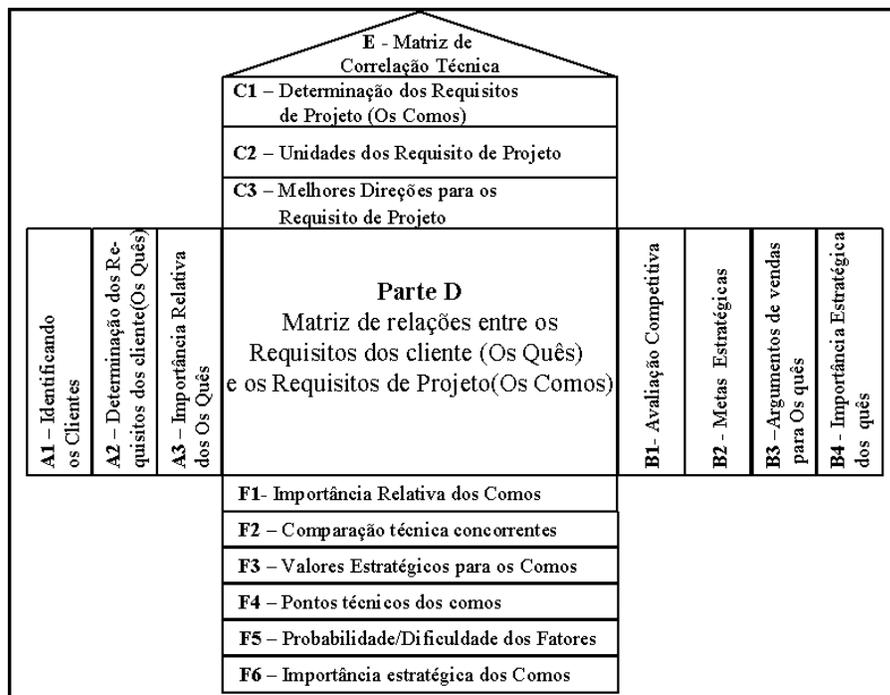


Figura 2. 7 – Casa da Qualidade: Descrição detalhada

Fonte: Akao (1995); Burke (2002); Chan and Wu, (2002a) e Cheng et al (2000).

De acordo com Akao (1995) a “Casa da qualidade é o resultado da união em forma de matriz, da tabela de Desdobramento da Qualidade Exigida (Requisitos dos Clientes) com a Tabela de Desdobramento das Características da Qualidade (Requisitos de Projeto)”. E é considerada matriz porque os itens de qualidade exigida têm correlação com alguma característica. Esta correlação é intrínseca, marcando os itens que guardam esta relação com um círculo ou com outro símbolo qualquer. “Desse modo, as qualidades do projeto são estabelecidas a partir da Tabela Desdobramento das Características da Qualidade (Requisitos de Projeto)”.

### 2.7.1 Parte A – Requisitos dos clientes (Os Quês)

De acordo com Chan and Wu, (2002a) o QFD inicia-se com o cliente. O primeiro passo de uma equipe de desenvolvimento de uma companhia para a construção de uma Casa da Qualidade, é a identificação dos clientes. Coletando as suas necessidades em relação ao seus produtos (organizando estas necessidades na forma de um diagrama de arvore), e logo após determinar “a relativa importância” de cada necessidade vista pelos clientes. (CHAN and WU, 2002a; PRATES, 1998).

De acordo com Chan *and* Wu, (2002a), Prates (1998), Cheng *et al* (1995) e Akao (1995) tem-se as seguintes etapas para a obtenção dos requisitos dos clientes.

### **2.7.1.1 Parte A1 – Identificando os Clientes**

De acordo com Akao, (1995) antes de se estabelecer a qualidade, é preciso conhecer o que o mercado alvo exige. Deve-se pesquisar e identificar não apenas as exigências evidentes, mas também as exigências latentes, para definir que tipo de “coisa (objeto)” deve ser produzido.

Cheng *et al* (1995), afirma que as metas de sobrevivência da empresa são estabelecidas a partir do planejamento estratégico, sendo desdobradas segundo o método de desdobramento das diretrizes. Deste desdobramento, segundo o autor, surgem as metas de desenvolvimento de produto, que direcionam todas as atividades. As atividades de “identificação das oportunidades do mercado” e “definição de mercado alvo” devem estar em consonância com estas metas e visam buscar de maneiras novas e melhores a satisfazer o mercado (clientes atuais e novos). De acordo com Cheng *et al.* (1995), isto se torna necessário para uma melhor identificação dos clientes onde deseja introduzir produtos.

- **Identificação das Oportunidades de Mercado**

Conforme Cheng *et al.* (1995), esta atividade exige muitas informações, que devem ser captadas sistematicamente pelas empresas. Sendo estas informações necessárias na avaliação das potencialidades dos mercados potenciais, que depende de vários fatores como: fatores de mercado, de competitividade, econômicos e financeiros e sócio-políticos.

- **Definição do Mercado Alvo**

Conforme Cheng *et al* (1995), selecionando os mercados, que apresentam boas oportunidades, deve-se refinar a definição de mercado, estabelecendo segmentos com limites bem claros. Segundo o autor a escolha do segmento (grupo alvo de consumidores) deve levar em consideração a vantagem competitiva da empresa, identificando o mercado no qual ela está apta a satisfazer as necessidades dos clientes melhor do que os concorrentes.

Analogamente Cheng *et al* (1995), Chan *and* Wu, (2002a) afirmam que os clientes devem ser identificados de acordo com a natureza do produto e da organização. Chan *and* Wu, (2002a) salientam que geralmente existem três tipos diferentes de consumidores: consumidores internos (acionistas, gerentes e empregados); Consumidores intermediários (atacadistas e varejistas); e os consumidores finais (destinatário do serviço, compradores e compradores institucionais).

Usualmente, o principal foco é os consumidores finais, que podem ser identificados por intermédio de informações prévias e pesquisas de marketing.

### 2.7.1.2 Parte A2 – Determinação dos Requisitos dos Clientes (Os Quês)

Após a identificação dos clientes, o próximo passo é determinar quais são os requisitos dos clientes (ou as qualidades exigidas pelos clientes). De acordo com Chan *and* Wu (2002a), esses requisitos são expressos pelas “palavras dos clientes” que podem ser coletadas por vários métodos, pelo departamento de marketing ou com o auxílio de uma agência de informações externas. Conforme os autores salientam existem vários métodos para a coleta dos requisitos dos clientes e dentre os mais conhecidos têm-se:

- **Survey:** Trata-se do envio de questionários à respeito dos produtos da empresa aos potenciais clientes via cartas e/ou e-mail e/ou telefone.
- **Grupo de Foco:** Trata-se de um pequeno grupo de clientes formado de 8 a 12 pessoas selecionadas randomicamente, para uma discussão livre e corrente sobre os produtos da organização.
- **Entrevistas Individuais:** O grupo de foco, segundo os autores, pode tender a reforçar as opiniões dos membros mais entrosados, enquanto as idéias e opiniões dos participantes mais quietos podem ser perdidos durante o processo. As entrevistas individuais podem superar esta debilitação e são muito efetivas em determinar o lado emocional dos consumidores na hora da decisão de compra.
- **Utilização do Produto:** Trata-se de um estudo do produto realizado a partir de sua utilização.
- **Observando e Ouvindo:** Neste método, os requisitos são obtidos através de conversas e comentários dos gerentes, engenheiros e compradores, que podem ser encontrados, em eventos comerciais.
- **Contatos de Campo:** Utilização de dados provenientes das reuniões de vendas e dos serviços de manutenção prestados pela organização.

Chan *and* Wu (2002a) afirmam que para facilitar as análises e as aplicações das necessidades coletadas, as mesmas devem ser organizadas em uma estrutura hierarquizada. Que segundo Cheng *et al.* (1995) devem ser organizadas e resumidas em uma forma sistêmica, desdobradas do nível abstrato para o concreto. Chan *and* Wu (2002a) e Prates (1998) salientam que os requisitos dos clientes devem ser arranjados em níveis, tendo como instrumento o

diagrama de árvore ou diagrama de afinidades. Conforme Chan *and* Wu (2002a), e Griffin *and* Hauser (1992) deve-se organizar os requisitos em três níveis hierárquicos, que podem ser estruturadas da seguinte forma: Requisitos Primários, Secundários e Terciários.

Os Requisitos Primários são usados para fixar as direções estratégicas dos produtos. Os Requisitos Secundários ou táticos indicam, especificamente, o que deve ser feito para a execução das direções estratégicas implícitas pelos requisitos primários. E os requisitos Terciários ou operacionais que provêm detalhes, para que soluções de engenharia possam ser desenvolvidas, para a satisfação dos requisitos secundários (GRIFFIN *and* HAUSER, 1992). Um exemplo de um vegetal frito é descrito pela *tabela 2.1* onde pode se observar o tipo de estrutura descrito pelos autores:

| Requisitos Primários | Requisitos Secundários   | Requisitos Terciários |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Ótimo Sabor          | Ingredientes Apropriados | Não muito Salgada     |
|                      |                          | Sem Gordura           |
|                      |                          | Meio Picante          |
|                      |                          | Apetitosa             |
|                      | Ótimo Odor               | Quente                |
|                      |                          | Fresco                |
| Odor açucarado       |                          |                       |
| Ótima Aparência      | Ótima Coloração          | Frescor               |
|                      |                          | Beleza                |
|                      |                          | Cor de jade           |
|                      | Boa Forma                | Dourada               |
|                      |                          | Não muito queimada    |
|                      |                          | Arranjo na travessa   |

Tabela 2. 1 - Estrutura Hierárquica dos Requisitos dos Clientes: Um exemplo de um vegetal frito, Fonte: Chan *and* Wu, (2002a).

Segundo Prates (1998), nesta fase deve se ter atenção às reações do cliente ao produto, pois é fundamental para as avaliações dos requisitos dos consumidores. Para isso, deve se conhecer as considerações do professor Noriaki Kano que conforme Prates (1998), afirmou existir três níveis na qualidade percebida pelo cliente:

A primeira é a Qualidade Atrativa, que quando incorporada ao produto causa grande satisfação ao consumidor, porém quando está ausente ou parcialmente incorporada a ele pode ser aceito com resignação pelos clientes. A Qualidade Atrativa está relacionada com as necessidades, que se fossem satisfeitas pelo produto, surpreenderiam e encantariam os consumidores que não

pedem diretamente por não saber da sua possível existência (CHENG *et al*, 1995 e PRATES, 1998).

A segunda é a Qualidade Linear, que traz maior satisfação aos clientes, à medida que aumenta o nível de desempenho do produto. Em outras palavras, são os itens que trazem satisfação aos consumidores, quando alcançam à suficiência no desempenho, enquanto que a sua ausência ou insuficiência traz insatisfação. O enfoque tradicional de desenvolvimento de produtos apresenta uma tendência a esse raciocínio (CHENG *et al*, 1995).

A terceira é a Qualidade Óbvia ou Esperada, que quando presente trazem pouca ou nenhuma satisfação, mas quando estão ausentes geram insatisfação. Estão relacionados com as necessidades básicas dos consumidores, que supõem que o produto satisfaça (CHENG *et al*, 1995 e PRATES, 1998). De acordo com Prates (1998), existem outras abordagens para os níveis da qualidade percebida pelo consumidor, que essencialmente têm as mesmas características do enfoque do professor Noriaki Kano.

Por ser esta fase inicial em um trabalho de QFD e a satisfação do cliente o principal objetivo de um sistema de qualidade, encontrar as necessidades dos consumidores e traduzir em requisitos técnicos, de maneira correta, tornam-se fundamental para o referido trabalho.

### **2.7.1.3 Parte A3 – Importância Relativa dos Requisitos dos Clientes**

Os requisitos dos clientes possuem diferentes prioridades para os mesmos, portanto neste passo o objetivo é encontrar e identificar a importância relativa de cada requisito. Conforme salienta Chan *and* Wu, (2002a), a organização deve trabalhar com os mais importantes requisitos e descuidar das necessidades menos enfatizadas pelos consumidores com o objetivo de melhorar o uso de seus recursos.

Peixoto (1998) define a importância relativa, como a o valor que os clientes dão a cada requisito. Geralmente é obtida diretamente junto aos consumidores, os quais atribuem uma “nota” a cada requisito. Segundo o autor esta nota deve obedecer a uma escala numérica pré-determinada. A escala é relativa quando o cliente indica a importância de cada requisito em comparação aos demais (este requisito é mais importante que aquele). A escala é absoluta, quando o cliente analisa a influência de cada requisito em sua decisão de compra do produto, sem compará-lo com os demais.

De acordo com Peixoto (1998), a pesquisa com escala relativa é mais fácil para o cliente, quando há poucos requisitos a serem comparados, mas torna-se complicada quando o número de requisitos é maior. Nesse caso, é melhor optar por uma escala absoluta.

Segundo Chan *and* Wu (2002a) e Prates (1998), o cliente deve ser convidado a dar notas de acordo com o grau de importância, dentro de uma escala de 1 a 10, sendo o número 1 o pouco importante e o número 10 muito importante (Escala Lickert, conforme Marconi e Lakatos, 1999).

Chan *and* Wu (2002a) afirmam que adicionalmente métodos de lógica difusa podem ser aplicados para tentar diminuir a subjetividade e a incerteza na opinião dos consumidores. Temponi *et al* (1999) e Akao (1995), ressaltam a utilização de métodos de lógica difusa (AHP) para a determinação de dentre as quais qualidades exigidas possui maior importância para o cliente. Além do emprego dos métodos de lógica difusa (AHP) têm-se utilizado a metodologia seis sigma para a determinação do grau de importância de cada requisito conforme é salientado por Silva (2002).

## **2.7.2 Parte B – Matriz de Planejamento**

A parte anteriormente apresentada de acordo com Chan *and* Wu, (2002a), é a parte qualitativa responsável pelos requisitos dos clientes, enquanto a matriz de planejamento é uma importante parte responsável sobre os dados quantitativos dos requisitos.

A parte B é também referenciada por Chan *and* Wu (2002a) e Prasad (1998), como sendo os Porquês (*WHYs*). Isto porque as indicações desta parte devem trabalhar com algum requisito dos clientes por intermédio da avaliação competitiva, das metas estratégicas e dos pontos de vendas fixados pelos requisitos e pelas importâncias estratégicas também derivadas dos requisitos.

### **2.7.2.1 Parte B1 – Avaliação competitiva**

De acordo com Prates (1998), trata-se de uma avaliação de quanto o produto da companhia e os produtos dos concorrentes atende às necessidades dos consumidores. Peixoto (1999) define a avaliação competitiva como uma pesquisa de mercado quantitativa, que busca identificar como os clientes percebem o desenvolvimento do produto atual da empresa, em comparação com os principais concorrentes. Eureka *and* Ryan (1992) salientam que a avaliação competitiva deve utilizar informações orientadas pelos consumidores, e ainda podem ser

empregados para estabelecer as Metas Estratégicas e ajudar no posicionamento do produto no mercado.

Para Akao (1995) e Chan *and* Wu, (2002a), assim como a importância dos requisitos, esta pesquisa pode utilizar uma escala relativa ou absoluta. Nesta etapa, a escala relativa é mais fácil para o cliente, principalmente quando há uma clara diferença de importância de desempenho. Mas quando as importâncias (ou desempenhos) são percebidas como iguais há uma dificuldade de determinar a “nota” adequada (os dois são iguais, mas são bons ou ruins?). Conforme salienta Peixoto (1999), entretanto mais importante ainda a avaliação relativa não torna explícitos quais requisitos são prioridades para a melhoria. Isto porque esta avaliação apenas demonstra como o cliente percebe a atual posição de competitividade do produto em relação aos concorrentes. O autor ainda afirma que esta avaliação não permite a clara identificação do nível de satisfação dos consumidores com o desempenho dos produtos, que ele considera o melhor do mercado, o que se torna a avaliação absoluta a mais adequada conforme salienta o autor.

Chan *and* Wu, (2002a) e Prates (1998), afirmam que os dados obtidos através desta pesquisas devem ser atribuídos em uma escala crescente de 1-5 ou de 1-10, avaliando como o serviço prestado atende a cada um dos requisitos do consumidor em relação aos principais concorrentes. Configurando um processo de *Benchmarking* de comparação contínua da empresa em relação a outras organizações.

### **2.7.2.2 Parte B2 – Metas Estratégicas para os Requisitos dos Clientes**

Após determinar qual a performance da companhia em relação aos concorrentes em cada requisito dos clientes pela avaliação competitiva, o próximo passo é estabelecer as metas para cada requisito. Chan *and* Wu, (2002a), afirmam que estas metas são numéricas e devem ser consideradas através da utilização da escalas de avaliação já estabelecida na seção anterior. Peixoto (1999) define as metas estratégicas como um planejamento para cada requisito do produto em desenvolvimento. Sendo determinados conforme salienta Cheng *et al* (1995), logo depois de completada a avaliação competitiva do cliente, utilizando-se o grau de importância dos requisitos e a própria avaliação dos consumidores como orientação para a tomada de decisões.

As metas conforme salientam Chan *and* Wu, (2002a), devem ser realmente fixadas com base em pesquisas, nos custos, no tempo e na avaliação tecnológica. As metas estratégicas refletem o tipo de atividade que uma companhia irá procurar fazer, para melhor satisfazer os requisitos dos clientes.

Após a determinação das metas estratégicas Silva (2002) aconselha o estabelecimento da chamada Taxa de Melhoria (TM) que é definida pelo autor como uma forma de inserir na importância final dos requisitos (pelo absoluto e relativo), a intenção da empresa, ou seja, o plano estratégico da empresa. Peixoto (1999) define este índice pela divisão do desempenho desejado para o produto em desenvolvimento “notas” obtidas para o desenvolvimento efetivo do produto atual. Reflete quantas vezes o produto precisa melhorar seu desempenho, em relação ao produto atual, para alcançar a situação planejada. A taxa de melhoria pode ser determinada pela empresa utilizando-se da equação 2.1:

$$\text{Taxa de Melhoria} = \frac{\text{Metas}}{\text{Avaliação dos Clientes}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

Metas = Metas estratégicas estabelecidas na escala de avaliação (Parte B2).

Avaliação dos Clientes = performance da companhia estabelecida no processo de comparação com os concorrentes também determinados na escala de avaliação (Parte B1).

### 2.7.2.3 Parte B3 – Argumentos de Venda

O próximo passo segundo Chan *and* Wu, (2002<sup>a</sup>), é determinar os argumentos de venda para a companhia, conforme os requisitos dos clientes para as informações prévias. Cheng *et al* (1995) define os argumentos de vendas como os benefícios-chave, que o produto fornecerá aos clientes, visando o atendimento de suas necessidades. Silva (2002) refere-se aos argumentos de venda como a identificação daqueles requisitos, que possuem maior apelo de vendas do ponto de vista do cliente, ou seja, são requisitos, que possuem uma grande importância comercial para a empresa. Peixoto (1999), afirma que estes requisitos poderão então ser empregados no campo para despertar o interesse do cliente e proporcionar um aumento de vendas. Para esta classificação usa-se a notação de Peixoto (1999):

| Nível | Valor                     | Descrição  |
|-------|---------------------------|--|
| 1.5   | Argumento Forte           | O consumidor é sensível a este argumento e é estratégico para a empresa. |
| 1.2   | Argumento de Vendas       | O consumidor é sensível.   |
| 1.0   | Não é Argumento de Vendas | O consumidor não é sensível a ele.                                       |

Tabela 2. 2 – Critério para Avaliação do Argumento de vendas

Fonte: Peixoto (1999).

#### 2.7.2.4 Parte B4 – Importância Estratégica dos Requisitos dos Clientes

Após o estabelecimento destas informações acima descritas, Chan *and* Wu, (2002a), salientam a determinação de um rank final para a importância estratégica, que pode ser obtida para cada requisito de cliente através da equação 2.2 definida por Silva (2002) e Chan *and* Wu, (2002a):

$$\text{IERC} = (\text{TM}) \times (\text{IRRC}) \times (\text{AVRC}) \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

IERC – Importância Estratégica dos Requisitos dos Clientes;

IRRC – Importância Relativa dos Requisitos dos Clientes (Parte A3);

TM – Taxa de Melhoria (Parte B2);

AVRC – Argumentos de Venda dos Requisitos dos Clientes (Parte B3).

A Importância Estratégica é definida por Silva (2002), como a prioridade de atendimento de cada requisito sob a lógica, de que os esforços de melhoria devem ser concentrados em três pontos: nos requisitos mais importantes, nos que estão em consonância com a estratégia da empresa e nos que a empresa precisa melhorar.

Peixoto (1999) salienta a utilização da importância Estratégica relativa para facilitar a rápida percepção da importância dos requisitos, sendo determinada pela conversão das importâncias estratégicas em porcentagem. Esta conversão, segundo o autor se dá através da divisão do peso absoluto de cada requisito determinado pela importância estratégica pelo resultado de todos os pesos absolutos.

Requisitos dos clientes com alta avaliação final indicam alto potencial de negócios e benefícios para a companhia e deste modo devem ser priorizados conforme salientam Chan *and* Wu, (2002a).

#### 2.7.3 Parte C - Requisitos de Projeto (os Comos)

Nesta parte são listados e estruturados os requisitos de projeto ou medidas técnicas (os Comos), identificadas pela equipe de desenvolvimento de produto. As unidades e metas destes requisitos de projeto são também determinadas para facilitar as análises e desenvolvimento posteriores.

### 2.7.3.1 Parte C1 – Determinação dos Requisitos de Projeto (os Comos)

Nesta etapa, os requisitos de clientes são transformados em requisitos de projetos. Prates (1998) define os requisitos de projeto como itens controláveis, determinados na companhia (equipes multifuncionais), para garantir que os requisitos dos consumidores sejam satisfeitos. São gerados a partir dos requisitos dos consumidores e devem indicar o que é mensurável e controlável e não devem incluir partes ou nomes de testes. De acordo com Chan and Wu, (2002a) os requisitos de projetos são Métodos, Medidas da Companhia, Exigências de Projeto, Medidas Técnicas e Características de Engenharia, os quais podem ser relatados e medidos junto aos requisitos dos clientes. Peixoto (1999) descreve a função dos requisitos de projeto como a de traduzir a “voz do cliente” para a “voz dos engenheiros”, ou seja, transformar os requisitos dos clientes em características de projeto, que sejam capazes de estabelecer a qualidade projetada na matriz técnica.

De acordo com a ASQ (2003), bons requisitos de projeto devem ser mensuráveis, globais e pró-ativos. Em prática, os requisitos de projeto podem ser usualmente gerados por padrões estabelecidos para os produtos atuais. Metodologicamente, Chan and Wu, (2002a) afirmam que os requisitos de projeto podem ser determinados através da constituição de um diagrama Causa-Efeito ou de um diagrama de Árvore. Segundo os autores a utilização do diagrama Causa-Efeito, assegura por intermédio de sua análise dos requisitos de projeto, que realmente os mesmos são as principais causas para as necessidades dos clientes.

Como na seção 2.7.1.2 o procedimento com os requisitos dos clientes, também pode ser utilizado nesta etapa. Conforme Chan and Wu, (2002a) e Cheng *et al* (2002) afirmam que o emprego do método do diagrama de Afinidades para organizar e selecionar quais os requisitos de projeto serão estruturados em uma forma hierarquizada, pode facilitar a análise e a interpretação dos resultados.

### **2.7.3.2 Parte C2 – Unidades dos Requisitos de Projeto (os Comos)**

Chan *and* Wu, (2002a) discorrem que para definir corretamente quaisquer Requisitos de Projeto, deve-se associá-los a uma unidade e a uma direção. De acordo com os autores, elas devem ser explícitas na matriz QFD com clareza e perfeição. Para a conclusão desta etapa, os autores sugerem a utilização do sistema internacional de medidas, pois os mesmo é um dos mais difundido entre os especialistas.

### **2.7.3.3 Parte C3 – Definição das Melhores Direções dos Requisitos de Projeto**

Segundo Chan *and* Wu, (2002a) para a implementação das direções, três possibilidades de definições podem ser definidas para os diferentes requisitos de projeto: Quanto maior melhor (aumentar); Quanto menor melhor (diminuir) e Quanto mais perto de um objetivo melhor (perto de).

## **2.7.4 Parte D - Matriz de relações entre os Requisitos dos clientes (O Quês) E de Projeto (os Comos)**

A matriz de relações segundo Chan *and* Wu, (2002a) é uma sistemática para identificar o grau de relação entre cada requisito do cliente com cada requisito de projeto. Completar a matriz de relações é um passo vital no processo QFD, desde que a análise no estágio final seja baseada em informações fortemente confiáveis sobre as relações simbólicas ou numéricas, nas interseções da matriz.

Cheng *et al* (1995) afirma que a matriz de relação deve ser preenchida com a participação de todos os membros da equipe de QFD e deve obter consenso sobre a intensidade das relações. Segundo Chan *and* Wu, (2002a), o trabalho de preenchimento da matriz de relações deve ser realizado da melhor maneira possível, pois ajuda a estabelecer se os requisitos de projeto satisfazem cada requisito de cliente. Os autores ainda salientam que muitas vezes o impacto de cada requisitos de projeto com cada requisito de cliente, são examinadas e definidas através do grau das relações entre eles, sendo as mesmas estabelecidas com a participação de todos os membros da equipe de QFD. Porém Hauser *and* Clausing, (1998), prescrevem que as relações podem ser identificadas não só pelo consenso da equipe, baseado na experiência dos seus membros, como também nas respostas dos clientes, por análise de dados estatísticos e por experimentos controlados. Akao (1995), propõem que as relações devem ser identificadas e checadas posteriormente por estatísticas e dados reais, obtidos em testes técnicos. Como já apresentado

anteriormente (seção 2.5), Sriraman *et al* (1990) apresentam uma metodologia associada ao QFD, utilizando o planejamento de experimentos (DOE) e métodos Taguchi para a realização desta análise.

Conforme salientam Silva (2002), Chan *and* Wu, (2002a) e Hauser *and* Clausing, (1998), a intensidade das relações deve ser indicada em quatro níveis (forte, média, fraca e inexistente) ou em três níveis (forte, media e inexistente). Porém Silva (2002), salienta que a maioria dos autores adota a intensidade das relações em quatro níveis. Chan *and* Wu, (2002a) salientam que podem ser utilizadas duas escalas para determinar estas relações. Cheng *et al* (1995), demonstram mais uma escala além das apresentadas por Chan *and* Wu, (2002a), que podem ser visualizadas na tabela 2.3. Os especialistas em QFD também gostam de utilizar símbolos para descrever as relações entre os requisitos de projeto e de cliente, (CHAN *and* WU, 2002a). Barros (2001), Cheng *et al* (1995), Silva (2002) e Prates (1998) sugerem o uso dos seguintes símbolos para representar os quatro níveis de relação, que também podem ser visualizadas na **tabela 2.3**.

| <b>Relação</b>                        | Forte   | Média   | Fraca   | Inexistente |
|---------------------------------------|---|---|---|-------------|
| <b>Valores Possíveis das Relações</b> | 9   | 3   | 1   | 0           |
|                                       | 5   | 3   | 1   | 0           |
|                                       | 4   | 2   | 1   | 0           |
| <b>Símbolo</b>                        |  |  |  | Em Branco   |

Tabela 2. 3 – Valores e símbolos utilizados para representar as relações.

Fonte: Barros (2001); Chan *and* Wu, (2002a); Cheng *et al* (1995); Silva (2002) e Prates (1998).

Cheng *et al* (1995) afirmam que se deve preencher as correlações por coluna (para cada requisito de projeto), e após o consenso no preenchimento de toda a matriz, pode-se verificar a consistência por linha. Para isso, observa-se para cada requisito de cliente de último nível, se a correlação estabelecida com os requisitos de projeto está correta. Os autores apresentam a seguinte regra para os parâmetros para a verificação das correlações:

- **Forte Correlação:** Significa que, com certeza, o requisito de projeto avalia diretamente o atendimento do requisito dos clientes;
- **Média Correlação:** Significa que, provavelmente, o requisito de projeto possa avaliar o atendimento do requisito dos clientes;
- **Fraca Correlação:** Significa que há uma suspeita que, o requisito de projeto possa avaliar, mesmo que diretamente o atendimento do requisito dos clientes.

### 2.7.5 Parte E - Matriz de Correlação Técnica

Silva (1995) afirma que a matriz deve assumir a forma de um telhado de duas águas porque segundo o autor na verdade, é uma matriz XY que recebe uma rotação de 45 graus. Mostra as relações positivas e negativas entre dois itens da lista dos requisitos de projeto. Ainda conforme Silva (1995) a matriz de correlação técnica é utilizada para determinar quando um requisito de projeto está em conformidade com os outros e onde podem ocorrer conflitos, indicando também onde pode haver necessidade de esforços adicionais. O autor confirma que o uso da matriz de correlação técnica ajuda a identificar um recurso, que pode ser utilizado para fins múltiplos, sendo extremamente útil, pois essas relações raramente são identificadas ou documentadas por outros meios.

Segundo Eureka *and* Ryan (1992), essa matriz descreve a correlação entre cada item dos requisitos de projeto através de um símbolo peculiar que representa taxas positivas ou negativas e a extensão de cada correlação, isto é, Positiva Forte, Positiva, Negativa e Negativa Forte. Estas correlações podem ser de apoio mútuo quando o desempenho favorável de um requisito ajuda o desempenho favorável de outro requisito, ou de conflito – quando desempenho favorável de um prejudica o desempenho favorável da outro (PEIXOTO, 1999).

Cheng *et al* (1995) afirmam que alguns requisitos de projeto possuem correlação negativa com outras, ou seja, quando se busca melhorar o valor de um requisito, automaticamente compromete-se o desempenho de outro. Os autores salientam também que os requisitos de projeto podem apresentar correlação positiva entre si, ou seja, quando se melhora o desempenho de um, automaticamente o desempenho de outro melhora. De acordo com Silva (1996) os símbolos positivos indicam quais são os itens da lista dos requisitos de projeto, que se reforçam mutuamente. Lembrando que os dois símbolos existentes, buscam quantificar em dois níveis o grau desta correlação. Os símbolos negativos mostram quais os itens conflitantes, sendo a quantificação do grau representada pelos dois símbolos existentes. Na tabela 2.4 é observado o critério estabelecido, a partir destas considerações relatadas acima.

| Símbolo | Tipo de Correlação | Descrição  |
|---------|--------------------|--|
| ++      | Positiva Forte     | Há uma correlação positiva forte entre as duas características técnicas. |
| +       | Positiva           | Há uma correlação positiva entre as duas características técnicas        |
| -       | Negativa           | Há uma correlação negativa entre as duas características técnicas        |
| --      | Negativa Forte     | Há uma correlação negativa forte entre as duas características técnicas  |

Tabela 2. 4 – Critério para o preenchimento da matriz de correlação técnica.

Fonte: Peixoto, (1999).

## 2.7.6 Parte F - Matriz Técnica

De acordo com Chan *and* Wu (2002a), esta matriz inclui muitas informações técnicas e poder ser unido a ambos, requisitos de projeto e as características das partes na segunda fase do modelo de quatro fases. Ainda conforme os autores a matriz técnica promove a ordenação inicial dos requisitos de projeto, baseado em um *rank* denominado de importância relativa através de informações provenientes das partes anteriores. Avaliações técnicas também são conduzidas nesta parte, onde se avalia a performance da companhia e dos competidores, de acordo com os requisitos dos clientes. Chan *and* Wu (2002a), os valores estratégicos dos requisitos de projeto podem ser fixados competitivamente através da avaliação técnica. E a probabilidade ou a dificuldade técnica destes valores estratégicos, também podem ser determinados na matriz técnica. Os autores salientam que a importância final dos requisitos de projeto pode ser computada utilizando-se as informações geradas nas etapas anteriormente da matriz técnica. Conforme os autores, os mais importantes requisitos de projeto determinados nesta etapa, são selecionados para ser introduzidos nas próximas etapas do método QFD, para serem analisados e desenvolvidos.

### 2.7.6.1 Parte F1 – Importância relativa dos Requisitos de Projeto (os Comos)

A avaliação da relativa importância de cada requisitos de projeto, de acordo com Chan *and* Wu (2002a), é uma medida ampla que indica o grau de relação de um requisito de projeto para todos os requisitos dos clientes. Para Cheng *et al.* (1995) esta etapa consiste em transferir a importância, ou seja, o peso relativo atribuído a cada item de tabela dos requisitos dos clientes para os itens da tabela dos requisitos de projeto, através das correlações identificadas no interior da matriz. No caso da matriz Casa da Qualidade, o que ocorre é a conversão do peso dos

requisitos dos clientes para os requisitos de projeto. Peixoto (1999) ainda afirma que a relativa importância de cada requisitos de projeto indica a importância de cada um dos mesmos, no atendimento das exigências dos clientes.

Chan *and* Wu (2002a), entretanto afirmam que esta importância deve ser obtida utilizando se dois fatores. Sendo o primeiro fator a avaliação final das importâncias relativa dos requisitos dos clientes (Parte A3) ou a Importância Estratégica (Parte B4) dependendo da análise e do que se deseja realizar. O segundo fator é a Intensidade das correlações na matriz de relações (Parte D). De acordo Burke *et al* (2002) existe uma fórmula simples, que pode ser utilizada em todo os casos relativos, a aplicação do método QFD. Esta fórmula foi demonstrada pelo autor e baseia-se no conceito dos dois fatores estabelecido por Chan *and* Wu, (2002a), para isto Burke *et al* (2002) utilizaram a chamada casa da qualidade (**tabela 2.5**), esta demonstração realizada pelo autor será apresentada a seguir:

| Requisito de projeto Vs. Requisitos clientes   | Importância | Requisito de projeto 1                   | Requisito de projeto 2                   | ... | ... | Requisito de projeto m                   |
|--|-------------|--|--|-----|-----|--|
| Requisitos clientes 1                          | $C_1$       | $S_{1 \times 1}$                         | $S_{1 \times 2}$                         | ... | ... | $S_{1 \times m}$                         |
| Requisitos clientes 2.                         | $C_2$       | $S_{2 \times 1}$                         | $S_{2 \times 2}$                         | ... | ... | $S_{2 \times m}$                         |
| ...  | ...         | ...                                      | ...                                      | ... | ... | ...                                      |
| ...  | ...         | ...                                      | ...                                      | ... | ... | ...                                      |
| Requisitos clientes n.                         | $C_n$       | $S_{n \times 1}$                         | $S_{n \times 2}$                         | ... | ... | $S_{n \times m}$                         |
| Importância relativa dos Requisitos de Projeto |             | $\sum_{i=1}^n C_i \times S_{i \times 1}$ | $\sum_{i=1}^n C_i \times S_{i \times 2}$ | ... | ... | $\sum_{i=1}^n C_i \times S_{i \times m}$ |

Tabela 2. 5 – Uma Casa da Qualidade Geral

Fonte: Burke *et al*, (2002).

A partir de uma análise criteriosa da tabela 2.5 o autor definiu a seguinte equação para o cálculo da Importância Relativa dos Requisitos de Projeto (os Comos):

$$\text{IRRP}_j = \sum_{i=1}^n C_i \times S_{i \times j} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde:

$\text{IRRP}_j$  – Importância Relativa dos Requisitos de Projeto

$i$  = Número dos requisitos dos clientes, com  $i = 1, 2, \dots, n$  ;

$j$  = Número de requisitos de projeto, com  $j = 1, 2, \dots, m$  ;

$C_i$  = Importância Relativa de Cada Requisito dos Clientes;

$S_{i \times j}$  = Intensidade das Relações na Matriz de Relações.

Conforme Peixoto (1999), deve se transformar o valor absoluto da Importância relativa dos Requisitos de Projeto em valores relativos ou percentuais, pois facilita a visualização do peso de cada requisito. Os valores relativos, segundo o autor, podem ser calculados dividindo-se o absoluto de cada requisito de projeto por resultado da soma de todos eles.

#### 2.7.6.2 Parte F2 – Comparação técnica com os concorrentes

Após determinar a Importância relativa dos Requisitos de Projeto, o próximo passo é conduzir uma avaliação comparativa da performance dos mesmos com produtos similares dos competidores da organização. Silva (1996) afirma que para comparar padrões técnicos da concorrência com os da empresa, devem ser utilizados os mesmos concorrentes, que constam da avaliação competitiva, estando a diferença em que serão comparados os requisitos de projetos e não os requisitos dos clientes.

De acordo com Chan *and* Wu, (2002a), esta etapa pode ser realizada através da utilização do marketing, porém esta tarefa apresenta algumas dificuldades à aplicação do QFD, como nem todos os parâmetros técnicos e o *know-how* dos produtos dos competidores podem ser facilmente obtidos, pois segundo os autores alguns são altamente confidenciais, mantidos desconhecidos até mesmo dos clientes. Entretanto, a equipe de desenvolvimento do QFD deve realizar todos os esforços necessários para adquirir estas informações comparativas. Se necessário Chan *and* Wu, (2002a), recomendam a aquisição dos produtos dos competidores para a realização de testes para a consumação desta análise comparativa. Em caso de extrema dificuldade na obtenção dos requisitos dos competidores, Chan *and* Wu, (2002a), aconselham uma cuidadosa avaliação técnica, que deve ser realizada através de uma comparação, utilizando uma escala (conforme

estabelecido na seção 2.7.2.1), representando a performance técnica dos produtos dos competidores.

### 2.7.6.3 Parte F3 – Valores Estratégicos

Uma vez priorizados os requisitos de projeto (seção 2.7.6.1) e realizada a comparação técnica com correntes (seção 2.7.6.2), a próxima etapa é fixar os valores estratégicos para uma melhor performance dos requisitos de projeto. De acordo com Prasad (1998), esses valores estratégicos também podem ser chamados *How Much* (Quanto) Cheng *et al* (1995) estabelecem esses valores como Qualidade Projetada, o que também é observado por Silva (2002). Entretanto, os valores estratégicos são denominados por Silva (1996) e Peixoto (1999) como valores visados ou objetivos. Observa-se que existe uma infinidade de possibilidades para a denominação das informações obtidas nesta etapa. Porém, este fato não é muito importante, pois de acordo com Silva (1996) estes valores devem ser estabelecidos para que a empresa possa ser competitiva no mercado.

Peixoto (1999) salienta que determinar os valores estratégicos é projetar os valores dos requisitos de projeto do produto em desenvolvimento. Segundo o autor, dentro do QFD os valores estratégicos devem ser capazes de atender satisfatoriamente as necessidades do cliente, melhorando a posição competitiva. Isso significa que esses valores devem refletir o planejamento estratégico para o produto pelo índice de melhoria dos requisitos dos clientes.

Chan *and* Wu (2002a) afirmam que objetivos de desempenho devem ser diferentes das especificações de projeto. Essencialmente, porque os objetivos de desempenho para um requisito de projeto representam um nível da performance sobre o mesmo, que a companhia acredita ser necessário para que seus produtos sejam competitivos em comparação com os concorrentes.

De acordo com Eureka *and* Ryan (1992), os valores estratégicos fornecem não só meios de assegurar que os requisitos dos clientes foram atingidos, como também estabelecem metas a serem posteriormente desenvolvidas. Os autores ainda ressaltam que sempre que possível os valores estratégicos devem ser mensuráveis, pois proporcionam um aumento nas oportunidades de análise e otimização. Segundo os autores quando a maioria dos valores estratégicos não for mensurável, provavelmente as definições dos requisitos de projeto (seção 2.7.3) não foram suficientemente detalhadas.

Cheng *et al.* (1995) afirma que os valores estratégicos podem ser entendidos como valores-meta para os requisitos de projeto do produto, levando-se em consideração a importância

relativa de cada um, a comparação técnica com os produtos da concorrência e os objetivos do projeto, considerando as restrições relativas à tecnologia e os custos. Determinar os valores estratégicos segundo Cheng *et al* (1995) significa traçar um plano de melhoria para os requisitos de projeto, implicando na definição de novos valores para os mesmos ou na manutenção dos níveis atuais, com o objetivo de superar os concorrentes naqueles itens de maior importância segundo o mercado.

Para a determinação destes valores Silva (1996), recomenda a realização de uma avaliação técnica, baseada na opinião dos membros da equipe e na opinião técnica dos especialistas, em projetos de produtos da companhia. Breyfogle (2000), recomenda a utilização da técnica Projeto e Análise de Experimentos (DOE) como forma de determinação dos valores estratégicos, estabelecendo um estudo detalhado dos efeitos dos requisitos de projeto e de suas interações sobre os requisitos dos clientes. De acordo com Cheng *et al.* (1995) para se obter os valores estratégicos, a equipe de projetos deve estar atenta as seguintes recomendações:

- a) Considerar inicialmente os requisitos de projeto que não interagem com qualquer outro. Para estes casos, os autores salientam que há liberdade para se definir seu valor ideal, levando em consideração o seu peso relativo, ou seja, a sua importância sob o ponto de vista dos clientes, sua posição competitiva e o custo associado a sua implementação.
- b) Definir em seguida os requisitos de projeto, que se correlacionam positivamente com outras, ou seja, melhorando o desempenho de um, o desempenho do outro é automaticamente melhorado. Nestes casos, os autores recomendam que se deve procurar atuar no requisito de projeto cuja sua alteração é mais barata ou mais fácil.
- c) Estabelecer por último, os requisitos de projeto que se correlacionam negativamente com outros. Nestes casos, os autores recomendam a realização de uma “negociação” entre os valores estratégicos estabelecidos para esses requisitos de projeto. Segundo Cheng *et al* (1995), algumas ferramentas estatísticas, como a “técnica Projeto e Análise de Experimentos (DOE)” e a “análise conjunta”, são muito úteis para a realização desta negociação. A análise conjunta baseia-se na elaboração de diversas combinações diferentes para os valores dos requisitos de projeto do produto. Estas possíveis alternativas são, então, submetidas à apreciação de uma amostra significativa de clientes, obtendo-se uma escala de preferências. Esta abordagem fornece resultados confiáveis e sua utilização é aconselhável quando os custos de experimentação não são muito elevados.

#### **2.7.6.4 Parte F4 – Argumentos de Venda dos requisitos de projetos**

Cheng *et al* (1995) define os argumentos de vendas como os benefícios-chave que o produto fornecerá aos clientes, visando o atendimento de suas necessidades. Conforme salienta Chan *and* Wu, (2002a), os argumentos de venda dos pontos técnicos dos requisitos de projeto, devem ser obtidos similarmente aos argumentos de vendas dos requisitos dos clientes (ver seção 2.7.2.3- parte B3). Os autores ainda atentam para a utilização da comparação técnica com os concorrentes e da importância relativa dos requisitos de projeto para a obtenção dos argumentos de vendas. Chan *and* Wu, (2002a), prescrevem que esses argumentos de vendas também devem ser incorporados para a determinação da importância estratégica final dos requisitos de projeto.

#### **2.7.6.5 Parte F5 – Dificuldade técnica dos Fatores.**

Akao (1996) afirma que este fator é uma nota que expressa a dificuldade tecnológica, que a empresa terá para obter o valor determinado para os valores estratégicos dos requisitos de projeto, com a confiabilidade projetada e com o custo objetivado. Por isso Silva (2002), salienta a necessidade da determinação de quais requisitos de projeto exigirá maior comprometimento de esforços e recursos na obtenção de seus valores estratégicos.

O fator de dificuldade técnica é usado na matriz da qualidade de acordo com Peixoto (1999), para corrigir o peso dos requisitos de projeto. Entretanto, essa correção do peso dos requisitos de projeto pode ser feita de duas maneiras segundo o autor:

- a) Atribuir maior importância a aqueles requisitos de projeto que implicam em uma menor dificuldade técnica. Sendo este tipo de escala aplicável a situações, onde o ciclo de vida do produto é breve, em função de melhoria contínua, que determina o lançamentos sucessivos de versões melhoradas do produto, em um curto espaço de tempo. A escala do fator neste caso é inversamente proporcional à dificuldade de se obter as metas estabelecidas pela dos valores estratégicos. Assim ao se multiplicar a importância relativa dos requisitos de projetos (Parte F1) pelos fatores de dificuldade técnica, obtém-se um peso corrigido menor para aqueles requisitos dos projetos com menores possibilidades de serem alcançados.
- b) Utilizar uma escala diretamente proporcional à dificuldade de se obter os valores estratégicos, onde o número maior significa a maior dificuldade técnica e o número menor significa menor dificuldade (Akao, 1996). Este caso se refere segundo Peixoto (1999), àquelas empresas que desenvolvem produtos com longos ciclos de vida, os quais ficam muito

tempo “disputando” o mercado com os novos produtos, lançados pelos concorrentes. Quando isso ocorre segundo o autor, é necessário que o produto incorpore imediatamente todos os requisitos de projeto prioritários para o atendimento das necessidades dos clientes. Torna-se, então, necessário o desprendimento de maiores recursos para a obtenção imediata de tecnologia que, viabilize essa incorporação.

#### **2.7.6.6 Parte F6 – Importância Estratégica dos Requisitos dos Projetos**

Conforme prescrevem Chan *and* Wu, (2002a), a importância relativa dos requisitos de projeto obtido na parte F1 (ver seção 2.7.6.1), leva em consideração apenas as relações obtidas na parte D (ver seção 2.7.3), entre os requisitos de projeto e dos clientes e envolvem informações sobre a comparação técnica com os concorrentes, os valores estratégicos dos requisitos técnicos e a sua dificuldade técnica, examinados nas seções anteriores ( partes F2-F5). Entretanto de acordo com os autores a avaliação obtida na parte F1 pode ser refletida como a importância básica dos requisitos de projeto. Nesta parte, os autores sugerem a adição de mais um passo na construção da matriz qualidade, para computar a avaliação final da importância de cada requisito de projeto. Para a realização desta etapa Chan *and* Wu (2002a), apresentam a seguinte equação 2.4 para o estabelecimento apropriado de um *rank* de prioridades para os requisitos de projeto.

$$\text{IERP} = (\text{IRRP}) \times (\text{DT}) \times (\text{AVRP}) \quad (\text{Equação 2.4})$$

Onde:

IERP – Importância Estratégica dos Requisitos de Projeto;

IRRP – Importância Relativa dos Requisitos de Projeto (Parte F1);

DT – Dificuldade técnica dos Fatores (Parte F5);

AVRP – Argumentos de Venda dos Requisitos de Projeto (Parte F4).

Os requisitos de projeto priorizados nesta etapa, são transportados para as próximas matrizes do método QFD, onde podem utilizar métodos similares adotados na matriz qualidade, (partes C-F). Para um total atendimento do método QFD utilizando a abordagem de quatro fases, serão necessárias mais três matrizes para a conclusão do método que por sua similaridade com a Casa da Qualidade não serão apresentados nesta revisão.

## 2.8 Os Benefícios do QFD

### 2.8.1 Benefícios Qualitativos

Segundo Chan *and* Wu (2002a), várias aplicações e estudos têm mostrado os benefícios do QFD. De acordo com os autores, Sullivan em um dos seus primeiros artigos já enfatizava a eficiência que o QFD pode trazer para as companhias. Fato este ocasionado, devido aos seguintes eventos verificados após a implementação do QFD: redução das necessidades de mudanças no projeto, realização de estratégia de marketing e da definição concisa dos objetivos do projeto do produto.

Conforme prescrevem Adiano (1995), Akao (1995), Cheng *et al.* (1995), Lobo (2000), Prates (1998) e Sullivan (1986), a prática, do QFD provê um método para ‘projetar qualidade’ pró-ativamente com os seguintes benefícios; (i) redução do número de modificações do produto e/ou processo em desenvolvimento; (ii) identificação das modificações necessárias, antes de realizar maiores despesas; (iii) redução dos riscos durante o tempo de desenvolvimento; (iv) redução do número de problemas no início da produção; (v) redução dos custos iniciais de produção; (vi) redução dos problemas de campo através da diminuição dos custos de garantia; (vii) a criação de uma base de conhecimento de projeto; introduzindo a chamada voz do cliente no processo de desenvolvimento; possibilitando maior possibilidade de atendimento das exigências dos clientes; proporcionado um aumento na comunicação entre departamentos funcionais.

Conforme salientam Chan *and* Wu (2002a), muitos autores tem abordado os benefícios intangíveis do QFD em suas experiências com o método. Portanto, será apresentado na **figura 2.8** um esquema global onde se apresenta de uma forma resumida dos benefícios qualitativos do QFD, englobando a maior parte dos benefícios citados pelos autores especializados em QFD.

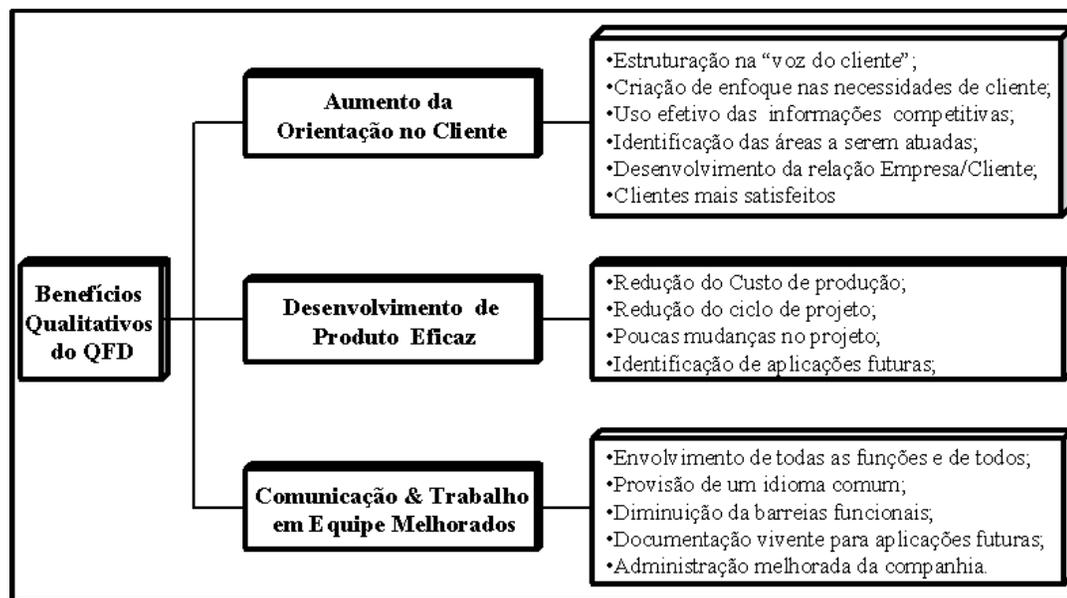


Figura 2. 8 - Os benefícios qualitativos do uso do QFD

Fonte: Chan *and* Wu, (2002a).

## 2.8.2 Benefícios Quantitativos

Chan *and* Wu, (2002a), esboçam os benefícios tangíveis comuns do QFD quando usado corretamente: 30-50% de redução de mudanças de engenharia; 30-50% de redução no ciclo de projeto; 20-60% de redução dos custos iniciais de fabricação e 20-50% a menos de pedidos por garantia. Cheng *et al* (1995), esboça algumas figuras, onde se observa o impressionante benefício que algumas companhias obtiveram após o uso do QFD. Conforme ainda esclarecem Chan *and* Wu, (2002a), a vasta quantidade de melhorias no ciclo de projeto, tempo de ciclo da produção, e custos iniciais de fabricação, vem com a capacidade do QFD de antecipar conflitos no projeto e problemas antes do início da produção ou antes da prototipagem.

De acordo com Lobo (2000) e Sullivan (1986), um expressivo exemplo quantitativo é o da Toyota, que adotou a metodologia QFD em 1977 e obteve bons resultados. Entre 1977 e abril de 1984, a Toyota Autobody introduziu quatro novos tipos de veículos Van. Usando como base o QFD desde de 1977, a Toyota informou uma redução de 20% nos custos iniciais de fabricação no lançamento de uma nova van em outubro de 1979; uma redução de 38% em novembro de 1982; e uma redução acumulada de 61% em abril 1984. Durante este período, o ciclo de desenvolvimento de projetos foi reduzido em um terço, que correspondeu melhorias na qualidade por causa da redução do número de mudanças de engenharia.

Conforme prescrevem Chan *and* Wu (2002a), os notáveis benefícios e a vasta adoção do QFD podem ser ilustrados por Miller, De Meyer e Nakane que realizaram um estudo de 10 anos na Europa sobre as melhorias na performance da manufatura através do sucesso da implementação de inúmeros programas de ação. Segundo os autores dentre os programas de ação melhores classificados em uma lista, o método QFD está presente nos 10 primeiros. Ainda segundo os autores, este fato também pode ser observado em uma lista dos principais programas japoneses. Os notáveis benefícios e a vasta adoção também é observada na indústria americana pela pesquisa realizada Cristiano *et al.* (2000) que constatou que o QFD é utilizado por 68,7% das empresas pesquisadas.

## 2.9 Considerações Finais

Existem várias formas de se abordar um sistema QFD, visto que a filosofia QFD oferece um amplo espectro de aplicações. No seu desenvolvimento o QFD não se restringe somente ao planejamento organizacional, planejamento de empresa de serviço, planejamento estratégico (HAUSER *and* CLAUSING, 1998).

O QFD tem-se destacado pela sua grande utilidade no planejamento das atividades dos que afetam a qualidade do produto da empresa. No aspecto de multidisciplinalidade do projeto e a necessidade de interface eficiente entre o projeto e outros departamentos, o QFD se destaca por oferecer uma ferramenta de planejamento da qualidade do produto, dentro dos parâmetros estabelecidos pelo consumidor, gerando um processo suave das atividades de projeto e desenvolvimento do produto. A fase de projeto com o QFD resulta num processo de comunicação eficiente, apresenta o que o consumidor deseja do produto, além de considerar os itens que afetam a qualidade do produto de uma maneira ou de outra. E de acordo com Cristiano *et al.* (2000) o QFD serve para um propósito dual, de não ser somente um método estruturado para assegurar o conhecimento das exigências dos clientes, mas também como uma ferramenta para facilitar mudanças organizacionais.

## 3. Projeto e Análise de Experimentos (DOE)

O capítulo que aqui se inicia, tem a finalidade de apresentar uma revisão bibliográfica sobre o DOE, assim como suas vantagens e benefícios. Descreve também a origem as aplicações método bem como as etapas para sua aplicação, além de uma breve explanação sobre o procedimento de cálculo para a realização de uma abordagem do método.

### 3.1 Considerações Iniciais

Um estudo realizado recentemente pela ASQ (*American Society for Quality*), sobre o futuro da qualidade para as primeiras duas décadas do século XXI, ressalta que “*a busca da qualidade deve mudar, tornar-se mais inovativa, flexível e rápida na implementação das soluções eficazes, que conduzam a resultados nos negócios e reflitam os desejos do consumidor*” (AQC, 2000). Tal pesquisa descreve que a inovação, flexibilidade e velocidade serão os fatores críticos para o sucesso das empresas em adquirir uma vantagem competitiva. Ainda, ressalta que a empresa terá um desafio maior ao adotar esses novos valores, porque os consumidores têm uma visão diferente e quase incomum desses conceitos.

Uma das formas de alcançar as características de competitividade ou fatores críticos segundo Galdámez *and* Carpinetti (2001) e atender as necessidades e expectativas dos consumidores é com a utilização das Técnicas de DOE no desenvolvimento de produtos ou nos processos de fabricação. Os conceitos de DOE são utilizados pelas empresas que buscam melhorar a qualidade dos produtos de forma contínua e estão efetivamente comprometidas em assegurar a satisfação do cliente, de maneira pró-ativa.

O experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes, nos quais se induzem mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas respostas ou variáveis de saída – **Figura 3.1.** Ao identificar as causas que provocam as falhas ou as perdas de qualidade nos produtos ou nos processos de fabricação, ações de melhoria mais eficazes poderão ser praticadas pelas empresas.

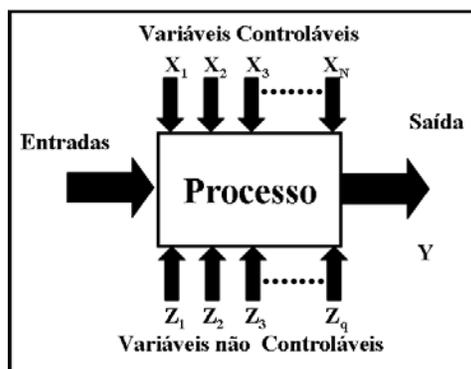


Figura 3. 1- Modelo geral de um processo ou sistema

Fonte: Montgomery (1997).

O DOE de acordo Puertas *and* Luis (2003), “é uma poderosa ferramenta de análise, que é utilizada para modelar e avaliar a influência das variáveis de um processo em alguma resposta específica que possui uma função desconhecida neste processo”. De acordo com Mont’Alvão (1997) o DOE é uma ferramenta que pode ser usada para se obter melhorias e aperfeiçoamentos em processos de manufatura. O resultado desse tipo de análise, segundo o autor, fornece valores nos quais os fatores devem atuar, para que se possa ter como resultado um produto de excelente qualidade.

Entre as diversas técnicas de Projeto e Análise de Experimentos, a técnica de planejamento fatorial fracionário  $2^{k-p}$  tem grande potencial de aplicação em problemas industriais, já que, com essa técnica, se consegue, com uma pequena quantidade de experimentos, analisar a influência de um número grande de fatores, e com isso, reduzir o tempo e o custo da experimentação. O planejamento e a análise dos resultados dos experimentos têm como objetivo principal, determinar os fatores de controle do processo que mais influenciam no resultado, ou seja, na qualidade do componente fabricado.

O DOE, segundo Montgomery (1997), deve-se a Ronald A. Fisher, que durante alguns anos foi responsável pela estatística e análise de dados na estação agrícola experimental em Londres. Fisher foi quem desenvolveu e usou pela primeira vez por volta dos anos 30 a técnica de análise de variância como ferramenta primária para a análise estatística do projeto experimental. Apesar de ele ser o pioneiro, existem muitos outros autores que contribuíram de maneira significativa nas publicações sobre o assunto. Entre eles encontram-se: F. Yates, R. C. Bose, O. Kempthorne, W. G. Cochran, R. H. Myers, J. S. Hunter e G. E. P. Box (MONTGOMERY, 1997). Ribeiro (2002) afirma que durante muitos anos, foram encontradas várias restrições à sua

aplicação nas empresas, onde se buscava resultados imediatos e o mercado consumidor não se mostrava tão exigente quanto nos dias atuais. Devido a esse quadro, o DOE sofria restrições quanto à sua aplicabilidade, por necessitar de tempo e recursos para a sua realização. Com o decorrer do tempo, as alterações no comportamento do mercado consumidor, acirrando a competitividade entre as organizações, aumentando o desenvolvimento tecnológico e introduzindo novas abordagens referentes ao conceito de qualidade despertou novamente o interesse em sua utilização.

Um dos motivos cruciais para o ressurgimento da técnica, DOE foi o sucesso alcançado por empresas japonesas a partir da década de 80, quando começaram a aceitar as idéias de melhorias da Qualidade propostas pelo professor Taguchi (HAMADA *and* NELDER, 1997).

### 3.2 Terminologia

Segundo Montgomery (1997) antes de se iniciar a experimentação, é importante estabelecer o planejamento dos experimentos. O autor ressalta a importância do domínio do problema por todas as pessoas envolvidas e recomenda que durante os experimentos, o processo seja cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja feito de acordo com os planos, pois erro no procedimento experimental, muito provavelmente, invalidará o resultado do experimento. Ainda, com a aplicação das técnicas de planejamento de experimentos e análise estatística de dados, procura-se obter a maior precisão das conclusões tiradas, a partir da análise dos resultados, reduzindo o número de testes e os custos da experimentação.

Galdámez *and* Carpinetti (2001), IQ-IBM (1985), Leitão (2000), Pizzolato (2002) e Werkema *and* Aguiar (1996b), entretanto, afirmam que antes de realizar qualquer experimento é necessário que todas as pessoas que participam da equipe, estejam familiarizadas com a terminologia utilizada em experimentação e alguns conceitos fundamentais, conforme segue:

**Experimento:** é um conjunto de observações que leva a um conjunto de observações correspondentes.

**Variáveis de resposta:** são as variáveis que sofrem algum efeito no experimento, quando mudanças, provocadas propositalmente, são produzidas nos fatores que regulam ou ajustam as máquinas no processo de fabricação. Nos testes, podem existir uma ou mais variáveis de resposta que sejam importantes de avaliar.

**Fatores de Controle:** são os fatores alterados deliberadamente no experimento, com a finalidade de avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e assim, poder determinar os principais fatores do processo. E podem ser qualitativos ou quantitativos.

**Fatores de Ruído:** são os fatores, conhecidos ou não, que influenciam nas variáveis de resposta do experimento. Alguns podem ser controlados, outros não. Neste caso, cuidados devem ser tomados na hora de realizar os testes. Este processo evita que os efeitos produzidos pelos fatores de controle, que estão sendo avaliados no experimento, fiquem misturados ou mascarados com os efeitos dos fatores de ruído.

**Níveis dos fatores:** são as condições de operação dos fatores de controle do processo ou sistema. Ao realizar os experimentos procura-se determinar os níveis ótimos do fator de controle ou o valor mais próximo definido pelos projetistas.

**Análise de Variância ou ANOVA (*Analysis of Variance*):** técnica estatística básica para analisar dados experimentais. Ela subdivide a variação total do conjunto de dados em partes significativas, associadas com fontes específicas de variação, a fim de verificar as hipóteses associadas aos parâmetros do modelo ou para estimar os componentes de variação. (BEMOWSKI, 1992);

**Interação:** situação na qual o efeito de um fator depende do nível do outro fator. Interações são incluídas em modelos estatísticos quando os fatores não agem de uma forma puramente aditiva.

**Tratamentos:** são as combinações específicas dos níveis dos fatores de controle no experimento. Isto significa que cada uma das corridas do experimento representará um tratamento.

**Efeito principal:** é a mudança da variável resposta produzida pela mudança no nível do fator de controle.

**Efeito de interação:** é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator.

**Matriz de Experimentos:** é o plano formal constituído para conduzir os experimentos. Nesta matriz são inclusos os fatores de controle, os níveis e tratamentos do experimento.

**Unidade experimental:** é a unidade básica para a qual será feita a medida da resposta.

**Experimento balanceado:** projeto que dispõe um número igual de  $n$  observações em cada célula experimental (conjunto de observações coletadas sobre condições comuns). Em

projetos não balanceados, o número de observações, conseqüentemente, é diferente para cada célula. Isto se deve, por exemplo, quando problemas não previstos ocorrem em um projeto balanceado na etapa de coleta de dados, resultando na perda de algumas observações. A análise de variância para projetos não balanceados apresenta dificuldades extras, devido à perda da propriedade de ortogonalidade (definição apresentada a seguir) (MONTGOMERY, 1991);

**Ortogonalidade:** ortogonalidade tem um significado geométrico que identifica planos ou sólidos, que possuem ângulos retos. Os arranjos ortogonais são projetos de experimentos especiais utilizados nos procedimentos de Taguchi.

**Confundimento:** é dito que há um confundimento entre os efeitos de dois ou mais fatores ou interações, quando estes efeitos não podem ser separados através da análise dos resultados. O confundimento, portanto, pode ser prejudicial ao experimento por sobrepor os efeitos. Entretanto, em alguns casos, ele torna o experimento viável do ponto de vista prático, como em projetos fatoriais fracionados. No caso de experimentos fracionados, se o confundimento é planejado, a perda de informações pode ser mínima;

**Contraste:** em muitas situações é necessário comparar os resultados obtidos em dois níveis de um mesmo fator ou interação. Neste caso, é útil examinar a diferença  $L = x_1 - x_2$ . Esta diferença é chamada de contraste;

**Fracionamento:** quando é necessário o emprego de ensaios em número reduzido, pode ser inevitável que certos efeitos dos fatores, apresentem-se confundidos com outros, sendo o confundimento a chave principal do fracionamento do experimento. Portanto, é dito que um projeto está fracionado, quando somente uma parcela ou fração do mesmo é executada. Por exemplo, no caso de experimentos preliminares, onde muitos fatores e/ou níveis são ensaiados e existe a hipótese de que interações entre 3 ou mais fatores não sejam significativas, procede-se o confundimento destes fatores, fracionando o experimento.

### 3.3 Princípios Básicos

Segundo Montgomery, (1997) para que os resultados obtidos de ensaios experimentais possam ser analisados através de métodos estatísticos, possibilitando a elaboração de conclusões objetivas, o planejamento experimental deve ser baseado numa metodologia também estatística, que é a única forma objetiva de avaliar os erros experimentais que afetam esses resultados. Há

três princípios básicos para a definição dos ensaios num planejamento experimental: o uso de replicação (ou replicagem), da aleatorização (ou “randomização”) e de blocos.

A replicação consiste na repetição de um ensaio sob condições preestabelecidas. Esta técnica permite obter uma estimativa de como o erro experimental afeta os resultados dos ensaios e se esses resultados são estatisticamente diferentes. Ela também permite verificar qual a influência de uma determinada variável sobre o comportamento de um processo, quando a comparação é feita pela média das amostras (MONTGOMERY, 1997; BUTTON, 2002).

A aleatorização ou randomização é uma técnica de planejamento experimental puramente estatística, em que a seqüência dos ensaios é aleatória e a escolha dos materiais que serão utilizados nesses ensaios também é aleatória. Uma das exigências do uso da metodologia estatística para o planejamento experimental e para a análise dos resultados é que as variáveis estudadas e os erros experimentais observados apresentem um caráter aleatório, o que é conseguido pelo emprego desta técnica. Ao se utilizar uma seqüência aleatória os erros experimentais, devidos a qualquer variável não-controlável (como o "warm-up" do instrumento), seriam distribuídos ao longo de todo o procedimento, aleatorizando-o e permitindo sua análise estatística (MONTGOMERY, 1997; BUTTON, 2002).

A técnica dos blocos permite realizar-se a experimentação com uma maior precisão, reduzindo a influência de variáveis incontroláveis. Um bloco é uma porção do material experimental que tem como característica o fato de ser mais homogêneo que o conjunto completo do material analisado. O uso de blocos envolve comparações entre as condições de interesse na experimentação dentro de cada bloco. Na análise com blocos, a aleatorização é restringida à seqüência de ensaios interna dos blocos e não ao conjunto total de ensaios (MONTGOMERY, 1997; BUTTON, 2002).

### **3.4 Etapas do Planejamento Experimental**

De acordo com Button (2002) e Montgomery, (1997), além de dominar a metodologia estatística necessária para o planejamento e para a análise dos dados, o pesquisador deve estar familiarizado com o que deseja estudar, como obter os dados, bem como ter uma estimativa qualitativa de como esses dados serão analisados. Também é desejável, segundo Button (2002), sempre que possível, o estabelecimento de um modelo físico-matemático que estabeleça funções

que relacionem as diversas variáveis influentes no processo com os resultados que se deseja analisar.

A elaboração de um modelo físico-matemático, mesmo que aproximado, possibilita um planejamento experimental mais dirigido, definindo-se valores de estudo adequados para as variáveis, reduzindo desta forma o número de ensaios (BUTTON, 2002). Vários autores como Coleman *and* Montgomery (1993); Galdámez (2002), IQ-IBM (1985); Mezgár *et al* (1997); Montgomery (1997); Pizzolato (2002); Teo *and* Sim (1995) e Werkema *and* Aguiar (1996b) ressaltam que, durante o processo de experimentação, seja feito um plano estratégico para coordenar o procedimento de planejamento e para a análise dos resultados. A seguir, apresentam-se as atividades do procedimento experimental descrito por estes autores:

- a) **Reconhecimento e definição dos Objetivos do experimento:** Esta etapa, de acordo com Button (2002), depende em grande parte da experiência já adquirida pelos pesquisadores em estudo de processos semelhantes. Galdámez (2002) resalta que, nesta fase inicial, é importante definir os problemas do produto e processo de fabricação, os objetivos do experimento e, principalmente, selecionar uma equipe que seja, responsável por todas as atividades do processo experimental. Werkema *and* Aguiar (1996b) afirmam que as pessoas envolvidas devem ser conscientizadas sobre a importância de se analisar cientificamente os fatores que influenciam no produto ou processo de fabricação.
- b) **Escolha das Variáveis (fatores de influência) e dos Níveis Específicos (Valores) em que essas variáveis serão avaliadas:** Nesta etapa, de acordo com Button (2002), deve-se verificar como essas variáveis serão controladas nos níveis escolhidos e como eles serão medidos. O autor ainda resalta que a avaliação intensiva de diversas variáveis pode ser necessária quando o estudo encontra-se em seus estágios iniciais e não se detém uma experiência anterior, exigindo a avaliação das variáveis em diversos níveis. Quando se deseja verificar a influência de uma variável em particular, o número de níveis deve ser reduzido, além de manter-se as demais variáveis influentes em níveis tão constantes quanto possível. Galdámez (2002) resalta que esta fase envolve a coleta de informações técnicas do produto ou processo, na qual as pessoas devem listar todos os fatores de controle, fatores de ruído, os níveis de ajustagem e as variáveis de respostas. Segundo Montgomery (1997), estas informações podem resultar de uma combinação entre o conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo.

- c) **Escolha da variável de resposta:** Conforme Button (2002), a variável resposta deve ser escolhida de modo que se garanta a objetividade na análise dos resultados obtidos. Montgomery (1997), acrescenta que as variáveis de resposta devem representar e quantificar as características da qualidade definidas anteriormente, possuindo uma unidade de medida apropriada, podendo ser relativa ou absoluta. O critério principal para sua escolha, segundo Button (2002), é que o erro experimental de medida da variável de resposta seja mínimo, permitindo a análise estatística dos dados com um número mínimo de réplicas. A variável resposta deve-se associar a um valor alvo ou condições desejáveis, ou seja, defini-la se a mesma é do tipo nominal-melhor, maior-melhor ou menor-melhor, bem como seus alvos e especificações.
- d) **Escolha da matriz experimental:** Montgomery (1997) afirma que se as três etapas anteriores foram realizadas corretamente, esta quarta etapa será relativamente simples de ser concluída. Galdámez (2002) ressalta que, ao se selecionar ou construir uma matriz experimental, devem ser considerados o número de fatores de controle, o número de níveis e os fatores não controláveis do processo. Ainda nesta fase são definidos o tamanho da amostra (número de réplicas), a seqüência de execução dos ensaios, a necessidade de aleatorização ou do uso de blocos. A experimentação é um processo iterativo, principalmente em processos complexos, com diversas variáveis influentes, não devendo partir de um conjunto extenso de experimentos, que envolva um grande número de variáveis estudadas em diversos níveis. É mais produtivo estabelecer um conjunto inicial com número reduzido de ensaios (poucas variáveis, poucos níveis de avaliação), aprender sobre o processo e, aos poucos, acrescentar novas variáveis e níveis e eliminar variáveis que não se apresentem influentes. Com essa iniciativa, reduz-se o número total de ensaios e, o que é mais importante, reservam-se os recursos para aqueles ensaios realmente importantes, que normalmente não fornecem resultados objetivos nas tentativas iniciais (Button, 2002).
- e) **Execução dos Experimentos:** Essa etapa, segundo Button (2002), é extremamente importante, pois garante a validade experimental e exige do pesquisador um conhecimento profundo dos instrumentos, equipamentos e métodos de controle e monitoramento;
- f) **Análise dos Resultados:** esta etapa, segundo Montgomery (1997), deve ser realizada com o uso de métodos estatísticos, a fim de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas. Entretanto, Button (2002), afirma que esses métodos não permitem afirmar se uma dada

variável apresenta ou não um determinado efeito: eles apenas garantem a confiabilidade e a validade dos resultados, de modo que se possa determinar o erro associado nas conclusões, de acordo com um dado grau de confiança previamente estabelecido. Montgomery (1997) afirma que existem excelentes softwares que podem ser utilizados para a análise dos dados.

**g) *Interpretação dos Resultados:*** Segundo Galdámez (2002), ao se finalizar a etapa anterior, as pessoas responsáveis pelo plano de atividades devem extrair as conclusões práticas dos resultados e recomendarem as ações de melhoria contínua do processo de fabricação. Uma prática comum nesta fase, segundo o autor, é o questionamento se as respostas satisfazem as questões experimentais definidas na primeira etapa ou a formulação de novas questões experimentais revisando as fases anteriores.

**h) *Elaboração das Conclusões e Recomendações:*** As conclusões e recomendações permitirão que decisões sejam tomadas a respeito do processo em estudo. Uma documentação extensa, com o uso de gráficos e tabelas, permite que se apresente os resultados obtidos, da análise efetuada, bem como futuras repetições do procedimento empregado (Button, 2002).

Segundo Montgomery (1997), muitas pesquisas em engenharia, em ciências e em indústrias são empíricas e, portanto, é feito uso extensivo de experimentações. Os métodos estatísticos, segundo o autor, podem aumentar a eficiência destas experimentações oferecendo maiores recursos à obtenção de conclusões satisfatórias. Devido a este fato, o autor faz algumas recomendações sobre o uso de métodos estatísticos para o planejamento experimental:

- O conhecimento técnico específico e não estatístico sobre o problema deve ser usado;
- O delineamento experimental deve ser o mais simples possível;
- Reconhecer a diferença entre o que é significativo estatisticamente e o que é significativo na prática, seja industrial ou de pesquisa;
- Reconhecer que a experimentação é um processo iterativo.

### 3.5 Benefícios e Aplicações do DOE

A seguir, destacam-se alguns benefícios da utilização das técnicas estatísticas de análise de experimentos apresentados por Montgomery (1997), Santos *and* Dias (2001):

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação, diminuindo o tamanho e o custo do experimento;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;

- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- Seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- Determinação de quais variáveis são mais influentes no processo;
- Redução dos efeitos produzidos pelas variáveis incontroláveis nas respostas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Montgomery (1997) apresenta algumas aplicações do DOE nas áreas de engenharia. Dentre elas, o autor destaca as seguintes aplicações:

Na caracterização de um processo, como exemplo desta aplicação, tem-se: a) Ribeiro (2002) utiliza o Projeto e análise de experimentos para avaliar e caracterizar o processo MIG/MAG pulsado. b) Puertas and Luis (2003) utilizam o DOE para avaliar e caracterizar o processo baseado na remoção de material de uma peça por meio de uma série periódica de descargas elétricas. Este processo é realizado através de uma máquina de descargas elétricas utilizada pelos autores para avaliar o processo por meio da regulação de seus parâmetros de operação.

Na otimização de um processo, como exemplo desta aplicação, tem-se: a) Shyy *et al* (2001) realiza a otimização global de um injetor de Gás-gás, elemento empregado em turbinas supersônicas através da revisão das técnicas de otimização baseadas nos métodos de redes neurais e no projeto e análise de experimentos. b) Melo (1999) utilizou o DOE para avaliar a concentração de nutrientes no solo do cerrado brasileiro, avaliando o crescimento, a produção de biomassa, relação raiz parte aérea e a concentração de nutrientes na biomassa de plantas de quatro espécies arbóreas nativas do cerrado em Latossolo Vermelho Escuro distrófico em três níveis destes nutrientes. c) Ledolter (2002) utiliza o DOE na forma do fatorial fracionado para investigar o processo de produção de uma fibra de viscoso. O autor utiliza dez fatores em 32 experimentos como estratégias para melhorar a força e o alongamento da fibra produzida, investigando também relação entre a força e a espessura da fibra.

No projeto de um produto, como exemplo desta aplicação, tem-se: a) Kaminari (2002) utilizou o DOE para realizar um estudo dos parâmetros de um projeto de reator de leito particulado para a recuperação de chumbo de efluentes industriais. b) Rodríguez *et al* (2003) utilizou o DOE como forma de analisar a influência de vários fatores como carga, temperatura,

presença de partículas de reforço e o tipo de técnica de spray térmica para a produção de camadas térmicas compostas de ligas do tipo NiCrBSi em aços carbonos (SAE1045). Este processo de produção de camadas térmicas compostas de ligas do tipo NiCrBSi em aços carbono, segundo os autores, é utilizado para revestimentos de pistão automotivos e em cilindros de laminação, pois estas camadas térmicas, feitas destes tipos de ligas, provêm resistência a corrosão em altas temperaturas de uso do material revestido.

Outro fator importante a ser ressaltado é a possibilidade de potenciais aplicação da metodologia DOE em vários setores das ciências como: Metalurgia (RODRÍGUEZ *et al* , 2003); Agronomia (MELO ,1999), Química (LEDOLTER,2002 e KAMINARI, 2002), Microbiologia (CASAS, 1997; SHIH *et al*, 2002), Processos de Fabricação (ANTONY, 2002; CHOUDHURY and BARTARYA, 2002; CHATTERJEE, 2003; PUERTAS and LUIS, 2003), Aeronáutica (SHYY *et al*, 2001), Manutenção (DESSOUKY and BAYER ,2002), Economia (GROENENDOAL and KLEIJENEN, 1997), Redes neurais (CHOUDHURY and BARTARYA, 2002; LIN *and* TSENG, 1999; TEO *and* SIM, 1995); Veterinária (NOORDEGRAAF, *et al* 2002) e etc.

### 3.6 Estratégias de Experimentação

O experimentador possui certo número de estratégias de experimentação com as quais pode lidar. Noordegraaf *et al* (2002) e Ledolter (2002) definem duas possibilidades de estratégias no experimento de um único fator (*one-factor-at-a-time*) e no experimento de vários fatores ao mesmo tempo. Rotondaro *et al* (2002) ainda subdivide a estratégia de vários ao mesmo tempo em sem planejamento e planejado.

**Experimento com único fator:** esta estratégia, segundo Box *et al* (1978), baseia se na idéia de que, para poder determinar que fator afeta a resposta, é preciso variar somente um a cada vez ou, então, não será possível realizar esta operação. Portanto, se houver vários fatores a testar, somente um fator de cada vez será alterado. Este tipo de estratégia possui alguns graves problemas que são: abordagem de apenas uma parte do espaço experimental (MONTGOMERY and RUNGER, 2003); baixa velocidade de obtenção de dados com elevada custo (MONTGOMERY and RUNGER, 2003); impossibilidade de avaliação de interações entre os fatores (BOX *et al* 1978); ineficiência para identificação de quais fatores realmente afetam em maior grau a resposta (LEDOLTER, 2002).

**Vários fatores ao mesmo tempo sem planejamento:** esta estratégia, segundo Rotondaro *et al* (2002), baseia-se na modificação de diversos fatores ao mesmo tempo, na esperança de que algum venha trazer o resultado esperado, denominada como estratégia metralhadora, onde se dão “tiros” para todos os lados, sem nenhum planejamento prévio das ações a serem empreendidas. Este tipo de estratégia apresenta os mesmos grave problemas da estratégia anterior.

**Vários fatores ao mesmo tempo com planejamento:** esta estratégia, segundo Ledolter (2002) e Rotondaro *et al* (2002), é a ideal. Segundo os autores, com esta estratégia pode-se calcular o efeito de cada fator na resposta, determinar a existência de eventuais interações entre os fatores, além de se empregarem os dados da melhor forma possível nas análises estatísticas.

### 3.7 Tipos de Projetos e Análise de Experimentos

Pizzolato (2002) afirma que a escolha adequada do tipo de DOE a ser utilizado em cada situação permite obter economia no número de rodadas experimentais, além de calcular, com a precisão adequada, as estimativas dos efeitos de interesse e da variabilidade do erro experimental. O planejamento de um experimento deve ser elaborado de forma a atender aos objetivos e restrições físicas e econômicas de cada experimento.

Para Juran (1998) *apud* Pizzolato (2002), os projetos experimentais podem ser classificados: pelo número de fatores a serem estudados, pela estrutura utilizada (blocos, fatoriais, hierárquicos ou aninhados, ou para superfícies de resposta) e pelo tipo de informação que ele fornece (estimativa dos efeitos, da variância ou mapeamento empírico das Variáveis Respostas). No ANEXO A - Tabela de Classificação dos projetos experimentais, são apresentados, sumariamente, em uma tabela, alguns projetos de experimentos de utilização mais freqüente. Um maior detalhamento desses projetos pode ser encontrado em Box *et al* (1978), Box and Dranper (1987), Montgomery (1997), Werkema & Aguiar (1996a) e Werkema & Aguiar (1996 b).

Na seqüência, apresenta-se o detalhamento dos projetos fatoriais, cujos conceitos são utilizados no decorrer deste trabalho.

### 3.8 Experimentos Fatoriais

Dos diversos tipos de categorias de experimentos existentes, segundo Rotondaro *et al* (2002), os fatoriais completos e/ou fracionados, de acordo com o autor, desempenham importante papel na busca de melhorias no processo, uma vez que identificam quais são os fatores cujo efeito tem maior impacto na resposta.

De acordo com Montgomery (1997), os projetos fatoriais são os mais econômicos para estudar efeitos produzidos por dois ou mais fatores. Neles se investigam todas as possíveis combinações para os níveis de um fator simultaneamente. Isso possibilita verificar o efeito principal do fator, ou seja, a mudança registrada na resposta quando o nível do fator é modificado, e o efeito de interação entre fatores sobre a variável respostas a ser analisadas.

Ledolter (2002), Werkema & Aguiar (1996b) afirmam que neste tipo de planejamento estão envolvidos  $k$  fatores, cada um deles presente em dois diferentes níveis (baixo e alto). Estes níveis, segundo Ledolter (2002), devem ser diferentes o bastante de forma que o pesquisador possa calcular o efeito da mudança dos mesmos na resposta em questão. Porém, o autor ainda salienta que estes valores não devem ser mantidos muito diferentes, pois podem produzir problemas de desempenho no experimento.

Werkema & Aguiar (1996b) afirmam que, em uma réplica completa do experimento com  $k$  fatores em dois níveis, são realizadas  $2 \times 2 \times \dots \times 2$  ( $k$  vezes) =  $2^k$  observações da variável resposta e, por este motivo, este planejamento é denominado Experimento fatorial.

Montgomery and Runger (2003) definem o planejamento fatorial com a investigação de todas as combinações possíveis dos níveis de cada fator em cada tentativa completa ou réplica do experimento.

Os experimentos fatoriais, segundo Ledolter (2002), são úteis em descobrir e determinar quais forças motrizes são importante em projetos de pesquisas, utilizando relativamente poucos experimentos. Uma outra característica importante dos experimentos fatoriais, conforme salienta o autor, é a estratégia de experimentação baseada na variação de muitos fatores ao mesmo tempo, permitindo avaliar os efeitos principais como também interações dos fatores envolvidos no experimento.

O tipo de planejamento fatorial a ser usado dependerá do objetivo que se deseja atingir com a experimentação. Os experimentadores podem estar interessados em avaliar os efeitos devido à alteração do nível de um ou mais fatores, na otimização da(s) resposta(s) ou ainda querendo descobrir dentro de que faixa os fatores podem ser alterados sem que a qualidade final do produto fique prejudicada. O planejamento Fatorial (completo e fracionado), o cálculo dos efeitos dos fatores e de suas interações e a análise de resultados serão agora apresentados.

### 3.9 Experimento fatorial completo $2^k$

No planejamento de experimentos fatoriais é comum encontrar experimentos planejados com técnicas fatoriais com dois, três ou mais níveis. Entretanto, não serão abordados, no presente trabalho, os testes executados em três ou mais níveis, visto que os experimentos realizados pelos pesquisadores foram em dois níveis. Devido a este fato, o tipo de planejamento em dois níveis será detalhado por esta secção. Alguns exemplos de aplicação e o detalhamento das técnicas fatoriais com três ou mais níveis são ilustrados por Box *et al* (1978), Box and Draper (1987), Melo (1999), Montgomery (1997) e Moris (2000).

Para ilustrar o procedimento dessa técnica, considere um experimento com  $k$  fatores ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ), e que cada um desses parâmetros foi testado com dois níveis (-1,+1) com  $r$  replicações. A **tabela 3.1** é conhecida como matriz de planejamento e apresenta, de forma genérica, a listagem de todos os possíveis tratamentos (combinações) dos fatores em seus respectivos níveis.

| Tratamentos | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | ..... | $x_k$ | Respostas                                | Resposta Media  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-----------------|
| 1           | -1    | -1    | -1    | ..... | -1    | $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1r}$          | $\bar{Y}_1$     |
| 2           | +1    | -1    | -1    | ..... | -1    | $Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2r}$          | $\bar{Y}_2$     |
| 3           | -1    | +1    | -1    | ..... | -1    | $Y_{31}, Y_{32}, \dots, Y_{3r}$          | $\bar{Y}_3$     |
| 4           | +1    | +1    | -1    | ..... | -1    | $Y_{41}, Y_{42}, \dots, Y_{4r}$          | $\bar{Y}_4$     |
| .....       | ..... | ..... |       | ..... | ..... | .....                                    | .....           |
| $2^k$       | +1    | +1    | +1    | ..... | +1    | $Y_{2^k 1}, Y_{2^k 2}, \dots, Y_{2^k r}$ | $\bar{Y}_{2^k}$ |

Tabela 3. 1- Matriz de planejamento para um planejamento fatorial  $2^k$  genérico

Fonte: Mont` Alvão (1997)

O procedimento que pode ser utilizado para construção da matriz genérica do experimento fatorial  $2^k$  é descrito por Devor *et al* (1992) *apud* Galdámez (2002) e Mont` Alvão (1997). Na matriz de planejamento, as colunas representam o conjunto de fatores investigados ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) e as linhas representam os diferentes níveis ou as combinações dos fatores (níveis codificados -1 (mínimo) e +1 (Maximo)). O seguinte algoritmo, baseado nos autores, pode ser utilizado para a construção da matriz:

1. A primeira coluna deve ser numerada de forma a identificar os tratamentos que serão realizados. Esta numeração não significa que os tratamentos sejam realizados nesta ordem. A ordem de realização dos tratamentos deve ser aleatória (conforme visto na seção 3.3).

2. Para a coluna do fator  $x_1$ , adota-se que os tratamentos ímpares sejam realizados no nível mínimo (-1) e os números pares sejam realizados no nível máximo (+1), ou seja, o sinal dessa coluna altera em grupos de  $2^0=1$ .
3. Para a coluna do fator  $x_2$ , adota-se que os dois primeiros tratamentos sejam realizados no nível mínimo (-1), seguidos de dois tratamentos realizados no nível máximo (+1) que, por sua vez, serão seguidos de mais dois tratamentos realizados no nível mínimo (-1) e assim, sucessivamente, até que o número total de tratamentos seja atingido, ou seja, o sinal dessa coluna altere-se em grupos de  $2^1=2$ .
4. Para a coluna do fator  $x_3$ , adota-se que os quatro primeiros tratamentos sejam realizados no nível mínimo (-1), seguidos de quatro tratamentos realizados no nível máximo (+1) que, por sua vez, serão seguidos de mais quatro tratamentos realizados no nível mínimo (-1) e assim, sucessivamente, até que o número total de tratamentos seja atingido, ou seja, o sinal dessa coluna altere-se em grupos de  $2^2=4$ .
5. Para a coluna do fator  $x_4$ , o sinal altera em grupos de oito ( $2^3=8$ ).
6. O procedimento será igual para os fatores  $x_5, x_6, \dots, x_k$ .
7. Para a coluna do fator  $x_k$ , o sinal altera em grupos de  $2^{(k-1)}$ .
8. A coluna das respostas deverá ser preenchida com os valores observados para cada um dos tratamentos. É interessante ressaltar que, a fim de se obter uma melhor estimativa do erro experimental (conforme visto na seção 3.3), a experimentação deve ser replicada. A última coluna é o resultado da média dos valores observados para cada um dos tratamentos.

Devor *et al* (1992) *apud* Galdámez (2002) definem que a forma de organizar o experimento é denominada de ordem padrão (*Standard Order*). Assim, ressaltam que com este arranjo, garante-se que todas as colunas da matriz sejam ortogonais entre si. Com este tipo de planejamento, é possível determinar os efeitos principais e a interação que as variáveis produzem na resposta. De acordo com Box *and* Draper (1987) e Ribeiro (2002), este método é denominado método de Yates.

### 3.9.1 Análise de Variância dos Efeitos no Experimento Fatorial $2^k$

#### 3.9.1.1 Para Dois Fatores $2^2$

Para ilustrar o procedimento desta técnica, Montgomery *and* Runger (2003) e Montgomery (1997) consideram o tipo mais simples de experimento fatorial, pois envolve

somente dois fatores (**A** e **B**), onde, segundo os autores, há **a** níveis do fator **A** e **b**, níveis do fator **B**. Esse fatorial de dois fatores pode ser observado na **tabela 3.2**.

|         |       | 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     | $Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$ | $Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$ | ..... | $Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$ |

Tabela 3. 2- Arranjo dos Dados para um planejamento fatorial com dois fatores

Fonte: Montgomery and Runger (2003) e Werkema & Aguiar (1996b).

O experimento possui *n* Réplicas e cada uma contem todas as **ab** combinações de tratamentos. A observação na *ij*-ésima célula para a *k*-ésima réplica é denotado por  $Y_{ijk}$ . Na realização do experimento, as *abn* observações seriam em uma ordem aleatória. Segundo Galdámez (2002) e Montgomery (1997), com o experimento organizado desta forma, é possível verificar se: a) A resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator **A**; b) A resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator **B**; c) A interação dos fatores (coluna\_xlinha) alterada significativamente a resposta.

Button (2002), Montgomery and Runger (2003), Montgomery (1997) e Werkema & Aguiar (1996b) definem o modelo estatístico do planejamento fatorial que é dado pela equação 3.1:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Equação 3. 1})$$

Para  $i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; e k = 1, 2, \dots, n$ .

Onde:

$Y_{ijk}$  - valor da variável de resposta para cada tratamento;

$\mu$  - média geral de todos os tratamentos;

$\tau_i$  - efeito do *i*-ésimo nível do fator **A**;

$\beta_j$  - efeito do *j*-ésimo nível do fator **B**;

$(\tau\beta)_{ij}$  - efeito da interação entre os fatores **A** e **B**;

$\varepsilon_{ijk}$  - erro aleatório associado a  $y_{ijk}$ .

A análise de variância, segundo Button (2002), Galdámez (2002) e Montgomery *and* Runger (2003), pode ser usada para testar hipóteses sobre os efeitos principais dos  $A$  e  $B$  e a interação  $AB$ . Werkema & Aguiar (1996b) afirma que a análise de variância é utilizada para verificar se os efeitos principais dos fatores e os efeitos das interações são realmente significativos.

Button (2002), Galdámez (2002), Montgomery (1997) e Montgomery *and* Runger (2003) propõem uma metodologia ou uma série de passos que podem ser utilizados para conduzir o teste de hipótese dos experimentos para a realização da análise de variância. Galdámez (2002) afirma que a análise de variância é utilizada para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as hipóteses investigadas com os experimentos.

Para Galdámez (2002), ao realizar um experimento, a equipe responsável deve partir de duas hipóteses sobre determinado(s) parâmetro(s). A primeira, segundo o autor, é a hipótese nula ( $H_0$ ). Essa hipótese parte do princípio de que não existe nenhuma diferença significativa entre os fatores analisados de uma população e será sempre a hipótese testada no experimento. A segunda hipótese, segundo o autor, é a hipótese alternativa ( $H_1$ ), partindo do princípio de que será verdadeira caso a hipótese nula seja considerado falsa.

De acordo com Button (2002) e Montgomery *and* Runger (2003), as hipóteses que devem ser testadas sobre os efeitos principais e as interações são dadas a seguir:

1.  $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$  (nenhum efeito principal do fator  $A$ ).  
 $H_1$ : no mínimo um  $\tau_i \neq 0$
2.  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$  (nenhum efeito principal do fator  $B$ ).  
 $H_1$ : no mínimo um  $\beta_j \neq 0$
3.  $H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ab} = 0$  (nenhuma interação).  
 $H_1$ : no mínimo um  $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$

Ao se desenvolver as hipóteses dos experimentos, é necessário, segundo Galdámez (2002), que seja calculado uma estatística específica com base em um determinado resultado da amostra. Tais valores podem ser determinados com o auxílio de softwares estático. Montgomery (1997) apresenta várias distribuições estatísticas ( $t$ -Student,  $f$ -Fisher, entre outras) que podem ser usadas para determinar a probabilidade de uma hipótese nula ser verdadeira.

Galdámez (2002), entretanto, salienta o risco na tomada de decisões por meio da metodologia do teste de hipóteses pois, segundo o autor, ao se utilizar uma estatística para se

concluir sobre os resultados do experimento, podem ser cometidos dois tipos de erros: o primeiro erro (erro tipo I) ocorre se a hipótese nula for rejeitada quando ela é verdadeira; o erro tipo II ocorre quando a hipótese não é rejeitada sendo falsa. Para tentar reduzir a probabilidade de errar nas decisões ou chegar a uma conclusão incorreta sobre os fatores que influenciam o sistema, os pesquisadores devem estimar alguns parâmetros para a realização do experimento que reduzem a possibilidade de ocorrência de algum tipo de erro. A seguir são definidos alguns destes parâmetros:

**O Nível de Significância:** a probabilidade de se cometer o erro tipo I é identificada com o nível de significância ( $\alpha$ ) do teste estatístico. Geralmente a equipe pode controlar a probabilidade do erro tipo I decidindo o nível de risco  $\alpha$  que estão dispostos a tolerar, em termos de rejeitar a hipótese nula quando ela for verdadeira. Alguns autores tradicionais da literatura DOE recomendam que o pesquisador deve selecionar os níveis de  $\alpha$  em 0,1 ou menos. Uma vez selecionado, o tamanho de  $\alpha$  torna possível determinar o tamanho da região de rejeição da hipótese nula do experimento. Com isso, os valores críticos que dividem a região de rejeição e não-rejeição podem ser determinados, conforme apresentado na **figura 3.2**, que representa a distribuição F. Os valores críticos são apresentados por Montgomery (1997).

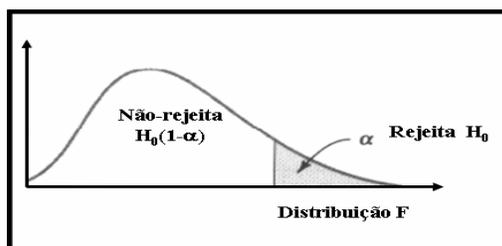


Figura 3. 2 – Regiões de rejeição e não-rejeição para uma distribuição F

Fonte: Galdámez (2002)

**O Coeficiente de Confiança:** o complemento da probabilidade de um erro tipo I é denominado de coeficiente de confiança, que é identificado como  $(1-\alpha)$ . Quando este termo é multiplicado por 100%, passa a simbolizar o nível de confiança do experimento. Com essa estimativa, é possível afirmar se a média aritmética da população está correta dentro de um intervalo. Montgomery (1997) destaca que, com este procedimento, se garante um valor pequeno para a probabilidade do erro tipo II.

A análise de variância, segundo Montgomery *and* Runger (2003), testa estas hipóteses pela decomposição da variabilidade total nos dados, em parte componentes, comparando, então, vários elementos nessa decomposição. A variabilidade total é medida pela soma quadrática total das observações definida pela equação 3.2

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n \left( y_{ijk} - \bar{y}_{\dots} \right)^2 \quad (\text{Equação 3. 2})$$

A decomposição da soma quadrática, segundo Button (2002), Montgomery *and* Runger (2003) e Montgomery (1997) pode ser escrita da seguinte forma simbólica (equação 3.3).

$$SQ_t = SQ_A + SQ_B + SQ_{AB} + SQ_E \quad (\text{Equação 3. 3})$$

Onde:

$SQ_A$  – Soma quadrática devido ao fator  $A$ ;

$SQ_B$  - Soma quadrática devido ao fator  $B$ ;

$Q_{AB}$  - Soma quadrática devido à interação  $AB$ ;

$SQ_E$  - Soma quadrática devido ao erro.

De acordo com Montgomery (1997), o número de graus de liberdades associado é:

| <b>Efeito</b>  | <b>Grau de liberdade</b> |
|----------------|--------------------------|
| $A$            | $a - 1$                  |
| $B$            | $b - 1$                  |
| Interação $AB$ | $(a - 1) (b - 1)$        |
| Erro           | $ab(n-1)$                |
| Total          | $abn-1$                  |

Tabela 3. 3- Graus de Liberdade

Fonte: Montgomery (1997).

Dividindo-se cada uma das somas quadráticas do lado direito da equação 3.3 pelo seu correspondente grau de liberdade, obtém-se as medidas quadráticas para  $A$  e  $B$ , a interação e o erro. Considerando que os fatores  $A$  e  $B$  sejam fixos, não é difícil mostrar que os valores esperados das medias quadráticas são:

$$E(MQ_A) = E\left(\frac{SQ_A}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{bn \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad (\text{Equação 3. 4})$$

$$E(MQ_B) = E\left(\frac{SQ_B}{b-1}\right) = \sigma^2 + \frac{an \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1} \quad (\text{Equação 3. 5})$$

$$E(MQ_{AB}) = E\left(\frac{SQ_{AB}}{(a-1)(b-1)}\right) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=i}^b (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)} \quad (\text{Equação 3. 6})$$

$$E(MQ_E) = E\left(\frac{SQ_E}{ab(n-1)}\right) = \sigma^2 \quad (\text{Equação 3. 7})$$

A partir da análise dos valores esperados dessas medias quadráticas, é claro que se as hipóteses nulas a respeito dos efeitos principais  $H_0: \tau_i = 0$ ,  $H_0: \beta_j = 0$  e as hipótese a respeito da interações  $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$  forem todas verdadeiras, todas as quatro médias quadráticas serão estimativas não tendenciosas  $\sigma^2$ .

Para testar o fato de os efeitos dos fatores nas linhas serem iguais à zero ( $H_0: \tau_i = 0$ ), usa-se a razão  $F_0 = \frac{MQ_A}{MQ_E}$  que terá uma distribuição  $F$ , com  $a-1$  e  $ab(n-1)$  graus de liberdade, se  $H_0: \tau_i$

$= 0$  for verdadeira. Essa hipótese nula será rejeitada com um nível de significância  $\alpha$ , se  $f_{0/A} > f_{\alpha}(a-1, ab(n-1))$ , concluindo-se que o fator  $A$  exerce um efeito significativo sobre a variável resposta. Similarmente, para testar a hipótese de que todos os efeitos dos fatores nas colunas são iguais à

zero ( $H_0: \beta_j = 0$ ), usa-se a razão  $F_0 = \frac{MQ_B}{MQ_E}$  que terá uma distribuição  $F$ , com  $b-1$  e  $ab(n-1)$  graus

de liberdade, se  $H_0: \beta_j = 0$  for verdadeira. Essa hipótese nula será rejeitada com um nível de significância  $\alpha$ , se  $f_{0/B} > f_{\alpha}(b-1, ab(n-1))$ , concluindo-se que o fator  $B$  exerce um efeito significativo sobre a variável resposta. Finalmente, para testar a hipótese  $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$ , que é a hipótese de que

todos os efeitos de interação são zero, usa-se a seguinte razão  $F_0 = \frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$  que terá uma

distribuição  $F$ , com  $(b-1)(a-1)$  e  $ab(n-1)$  graus de liberdade, se  $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$  for verdadeira. Essa hipótese nula será rejeitada com um nível de significância  $\alpha$  se  $f_{0/B} > f_{\alpha}(b-1)(a-1), ab(n-1))$ ,

concluindo-se que a interação  $AB$  exerce um efeito significativo sobre a variável resposta. (MONTGOMERY *and* RUNGER 2003; WERKEMA & AGUIAR 1996b),

Montgomery *and* Runger (2003) destacam que é, geralmente, melhor conduzir primeiro o teste para interação e avaliar os efeitos principais. Pois, segundo os autores, se a interação não for significativa, a interpretação dos testes sobre efeitos principais é direta. Entretanto, os autores salientam que, quando a interação for significativa, os efeitos principais dos fatores envolvidos na interação podem não ter muito valor prático interpretativo. O conhecimento da interação, de acordo com os autores, é, geralmente, mais importante que o conhecimento acerca dos efeitos principais.

A seguir, são mostradas equações (Equação 3.8; 3.9; 3.10; 3.11 e 3.12) para o cálculo das somas quadráticas para uma análise de variância com dois fatores.

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad (\text{Equação 3. 8})$$

$$SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad (\text{Equação 3. 9})$$

$$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad (\text{Equação 3. 10})$$

$$SQ_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y^2 \dots}{abn} - SQ_A - SQ_B \quad (\text{Equação 3. 11})$$

$$SQ_E = SQ_T - SQ_{AB} - SQ_A - SQ_B \quad (\text{Equação 3. 12})$$

De acordo com Button (2002), Galdámez (2002), Montgomery (1997) e Montgomery *and* Runger (2003), os cálculos são, geralmente, mostrados em uma tabela de análise de variância tal como a **tabela 3.4**.

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática                           | $F_0$                        |
|-------------------|-----------------|--------------------|--|------------------------------|
| A tratamentos     | $SQ_A$          | $(a - 1)$          | $MQ_A = \frac{SQ_A}{(a - 1)}$              | $F_0 = \frac{MQ_A}{MQ_E}$    |
| B tratamentos     | $SQ_B$          | $(b - 1)$          | $MQ_B = \frac{SQ_B}{(b - 1)}$              | $F_0 = \frac{MQ_B}{MQ_E}$    |
| Interação         | $SQ_{AB}$       | $(a - 1)(b - 1)$   | $MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$ | $F_0 = \frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$ |
| Erro              | $SQ_E$          | $abn(n - 1)$       | $MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$            |                              |
| Total             | $SQ_T$          | $(abn - 1)$        |  |                              |

Tabela 3. 4- Análise de Variância Para Um Fatorial Com Dois Fatores, Modelo Fixo.

Fonte: Montgomery (1997).

### 3.9.1.2 Caso Geral $2^k$

Todos os procedimentos apresentados até agora para os experimentos fatoriais  $2^2$  podem ser generalizados para o caso dos planejamentos  $2^k$ , isto é, aqueles experimentos onde estão envolvidos os efeitos de  $k$  fatores, cada um deles presente em dois níveis, sobre uma variável resposta de interesse (WERKEMA & AGUIAR 1996b).

Conforme Montgomery *and* Runger (2003), afirma-se a necessidade de se estudar o experimento no caso dos planejamentos  $2^k$ , pois segundo o autor, muitos experimentos envolvem mais de dois fatores. Nesta seção, será introduzido o caso em que existem  $a$  níveis do fator  $A$  e  $b$  níveis do fator  $B$ ,  $c$  níveis do fator  $C$  e assim sucessivamente, arrumados em um experimento fatorial completo. Em geral, Montgomery *and* Runger (2003) relatam que haverá  $abc...n$  observações totais se houver  $n$  réplicas do experimento completo.

Para analisar dados oriundos de projetos fatoriais com mais de dois fatores, utiliza-se a análise de variância para  $k$  fatores com o modelo estatístico da equação (3.13). Para melhor entendimento, considerou-se, como exemplo, o experimento com três fatores.

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (\text{Equação 3.13})$$

Para  $i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, c; e l = 1, 2, \dots, n$ .

Onde:

$Y_{ijk}$  - valor da variável de resposta para cada tratamento;

$\mu$  - média geral de todos os tratamentos;

$\tau_i$  - efeito do  $i$ -ésimo nível do fator  $A$ ;

$\beta_j$  - efeito do  $j$ -ésimo nível do fator  $B$ ;

$\gamma_k$  - efeito do  $k$ -ésimo nível do fator  $C$ ;

$(\tau\gamma)_{ik}$  - efeito da interação entre os fatores  $A$  e  $C$ ;

$(\beta\gamma)_{jk}$  - efeito da interação entre os fatores  $B$  e  $C$ ;

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  - efeito da interação entre os fatores  $A$ ,  $B$  e  $C$ ;

$\varepsilon_{ijkl}$  - erro aleatório associado à  $Y_{ijkl}$ .

Novamente, o objetivo é verificar se são significativos os efeitos de cada fator independentemente, bem como de suas interações com os demais fatores. Nos projetos fatoriais  $2^k$ , estudam-se  $k$  fatores a dois níveis (nível alto e nível baixo). Esses níveis podem ser quantitativos ou qualitativos. De acordo com Pizzolato (2002), os projetos fatoriais  $2^k$  são utilizados, principalmente, nos estágios iniciais de uma pesquisa quando se faz necessário investigar muitos fatores. Esse tipo de projeto possibilita a realização de um número pequeno de rodadas para o estudo dos fatores e suas interações. Como cada fator só é estudado a dois níveis, a utilização de projetos fatoriais  $2^k$  pressupõe que a variável de resposta apresentará um comportamento, aproximadamente, linear na região de investigação.

Considerando-se que  $A, B$  e  $C$  sejam fatores fixos, a análise de variância é mostrada na **tabela 3.5**. O teste F, a respeito dos efeitos principais e das interações, é diretamente proveniente dos valores esperados das médias quadráticas. Essas razões seguem a distribuição F sob as respectivas hipóteses nulas.

| Análise de Variância | Soma Quadrática | Graus de Liberdade | Média Quadrática | Valor Esperado Da Média Quadrática             | $F_0$               |
|----------------------|-----------------|--------------------|------------------|--|---------------------|
| $A$                  | $SQ_A$          | $(a - 1)$          | $MQ_A$           | $\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{(a-1)}$   | $\frac{MQ_A}{MQ_E}$ |
| $B$                  | $SQ_B$          | $(b - 1)$          | $MQ_B$           | $\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{(b-1)}$  | $\frac{MQ_B}{MQ_E}$ |
| $C$                  | $SQ_C$          | $(c - 1)$          | $MQ_C$           | $\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_j^2}{(c-1)}$ | $\frac{MQ_C}{MQ_E}$ |

Tabela 3. 5- Análise de Variância para o Modelo de Efeitos Fixos com Três Fatores

Fonte: Montgomery and Runger (2003),

Continuação da Tabela 3.5

|       |            |                   |            |   |                         |
|-------|------------|-------------------|------------|---|-------------------------|
| $AB$  | $SQ_{AB}$  | $(a-1)(b-1)$      | $MQ_{AB}$  | $\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$                 | $\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$  |
| $AC$  | $SQ_{AC}$  | $(a-1)(c-1)$      | $MQ_{AC}$  | $\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$                | $\frac{MQ_{AC}}{MQ_E}$  |
| $BC$  | $SQ_{BC}$  | $(b-1)(c-1)$      | $MQ_{BC}$  | $\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$               | $\frac{MQ_{BC}}{MQ_E}$  |
| $ABC$ | $SQ_{ABC}$ | $(a-1)(b-1)(c-1)$ | $MQ_{ABC}$ | $\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$ | $\frac{MQ_{ABC}}{MQ_E}$ |
| Erro  | $SQ_E$     | $abn(n-1)$        | $MQ_{AB}$  | $\sigma^2$  |                         |
| Total | $SQ_T$     | $(abn-1)$         |            |   |                         |

Tabela 3. 5- Tabela da Análise de Variância para o Modelo de Efeitos Fixos com Três Fatores  
 Fonte: Montgomery and Runger (2003),

### 3.9.2 Efeito Principal de um Fator e da Interação Entre Dois Fatores

Em experimentos fatoriais, podem ser identificados quatro elementos, conforme salientam Box *et al.*(1978) e Montgomery (1997). São eles: combinações de tratamentos, efeitos, contrastes e somas quadradas. Pode-se dizer que as somas quadradas (utilizadas na análise de variância) "originam-se" dos efeitos que, por sua vez, originam-se dos contrastes e estes últimos originam-se das combinações dos tratamentos. Para exemplificar e não provar, utilizar-se-á um projeto fatorial  $2^3$ , que possui 8 (oito) combinações de tratamentos, 7 (sete) contrastes, 7 (sete) efeitos e 7 (sete) somas quadradas. Geometricamente, o planejamento é representado por um cubo, conforme mostrado na **figura 3.3**, com oito corridas experimentais, formando os vértices do cubo. Este planejamento, segundo Montgomery and Runger (2003), permite que três efeitos principais (A,B e C) sejam estimados juntamente com as interações de primeira (AB, AC e BC) e de terceira ordem (ABC).

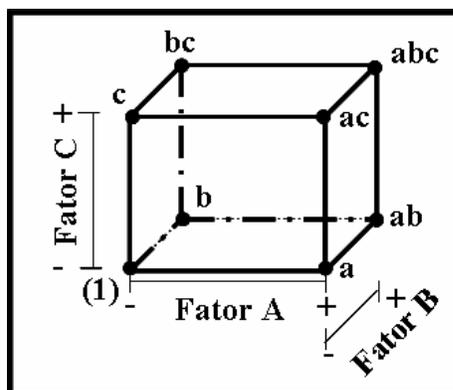


Figura 3. 3- Representação gráfica do projeto Fatorial  $2^3$

Fonte: Montgomery and Runger (2003) e Leitão (2000).

De acordo com Montgomery *and* Runger (2003) e Werkema & Aguiar (1996b), uma notação especial pode ser utilizada para marcar as combinações dos tratamentos. Em geral, uma combinação de tratamentos é representada por uma série de letras minúsculas. Montgomery *and* Runger (2003) ressaltam que, se uma letra estiver presente, então o fator correspondente é corrido no nível mais alto naquela combinação de tratamento; se estiver ausente, o fator correspondente é corrido no nível mais baixo. Este fato pode ser observado ao se analisar a **figura 3.3**. Werkema & Aguiar (1996b) afirmam que, de acordo com a codificação, o tratamento em que todos os fatores estão no nível mais baixo deve ser representado pelo símbolo (1). As letras minúsculas (1) *a*, *b*, *ab*, *c*, *ac*, *bc* e *abc* também representam, segundo Montgomery *and* Runger (2003), o total de todas as *n* réplicas em cada uma das oito corridas no planejamento. Esta representação também é, usualmente, utilizada para representar os totais de todas as medidas da variável resposta correspondentes aos tratamentos identificados por este símbolos.

A seguir, é apresentado o método generalizado que pode ser utilizado para estimar os efeitos principais e de interação entre os fatores. Este método é descrito por Montgomery *and* Runger (2003), Montgomery (1997) Werkema & Aguiar (1996b) e Buton (2002).

Os efeitos principais correspondem à mudança da resposta média quando um nível de um fator é alterado de -1 para +1, mantendo-se os outros fatores constantes. Observa-se, da **figura 3.3**, que os efeitos principais podem ser facilmente estimados calculando a média das quatro combinações de tratamento do lado do cubo onde o fator se encontra no nível mais alto e subtraindo, dessa quantidade, a média das quatro combinações de tratamento no lado do cubo onde o fator se encontra no nível mais baixo. Portanto, o efeito principal de um fator representa a

diferença entre as respostas obtidas para os dois níveis do fator, ou seja, o efeito principal é dado pela seguinte equação:

$$Fator = \bar{y}_{+1} - \bar{y}_{-1} \quad (\text{Equação 3. 14})$$

Da função acima, tem a equação 3.15 para o fator A:

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{(a + ab + ac + abc)}{4n} - \frac{((1) + b + c + bc)}{4n} \quad (\text{Equação 3. 15})$$

Esta equação pode ser rearranjada da seguinte forma, obtendo:

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (\text{Equação 3. 16})$$

De uma maneira similar, o efeito B e C foram determinados obtendo-se as seguintes equações:

$$B = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (\text{Equação 3. 17})$$

$$C = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (\text{Equação 3. 18})$$

Os Efeitos de interação de segunda ordem podem ser facilmente calculados. Uma medida da interação  $AB$  é a diferença entre os efeitos médios de A nos dois níveis de B. Por convenção, metade dessa diferença é chamada de interação  $AB$ .

$$AB = \frac{1}{2} (\text{Efeitos Médios de A em } (B+) - \text{Efeitos Médios de A em } (B-)) \quad (\text{Equação 3. 19})$$

Da equação 3.19 e da **figura 3.3** e tem-se:

$$AB = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[(abc - bc) + (ab - b)]}{2n} - \frac{[(ac - c) + (a - (1))]}{2n} \right\} \quad (\text{Equação 3. 20})$$

Nesta forma, a interação é facilmente vista como a diferença entre dois planos diagonais no cubo da **figura 3.3**. Rearranjando a equação 3.20, tem-se:

$$AB = \frac{1}{4n} [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (\text{Equação 3. 21})$$

Utilizando-se de uma lógica similar e referindo-se a **figura 3.3**, tem-se para as interações  $AC$  e  $BC$ :

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (\text{Equação 3. 22})$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \tag{Equação 3. 23}$$

A interação *ABC* é definida como a diferença média entre a interação *AB* para os diferentes níveis de *C*. Como antes, pode-se interpretar a interação *ABC* como a diferença nas duas médias.

$$ABC = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \tag{Equação 3. 24}$$

De acordo com Montgomery *and* Runger (2003), uma tabela de sinais mais e menos pode ser desenvolvida a partir dos contrastes, resultando na tabela 5.6, que são definidos por Werkema & Aguiar (1996b) como uma combinação linear dos totais das medidas da variável resposta obtidos para os tratamentos considerados no experimento. As quantidades verificadas nos colchetes das equações 3.15 a 3.24, segundo Montgomery *and* Runger (2003), são os contrastes nas combinações dos tratamentos. Os contrastes para qualquer fator pode ser estabelecido a partir desta tabela. Os sinais para os efeitos principais são determinados utilizando-se o mesmo método de calculo utilizado para a determinação da matriz experimental (ver seção 3.9). Uma vez estabelecido, os sinais para os efeitos principais e os sinais para as colunas restantes podem ser obtidos pela multiplicação das colunas apropriadas precedentes, linha por linha.

A tabela de sinais apresenta as seguintes propriedades (MONTGOMERY, 1997): (i) exceto para a coluna *I* (Identidade), cada coluna tem o mesmo número de sinais positivos e negativos; (ii) a soma dos produtos de sinais de quaisquer duas colunas é zero; (iii) a multiplicação da coluna *I* por qualquer outra coluna mantém esta inalterada; (iv) o produto de quaisquer duas colunas resulta em uma outra coluna da tabela, por exemplo:  $AxB=AB$  e  $ABx B=AB^2= A$

| Combinações dos Tratamentos | Efeito Fatorial |   |   |    |   |    |    |     |
|-----------------------------|-----------------|---|---|----|---|----|----|-----|
|                             | I               | A | B | AB | C | AC | BC | ABC |
| (1)                         | +               | - | - | +  | - | +  | +  | -   |
| A                           | +               | + | - | -  | - | -  | +  | +   |
| B                           | +               | - | + | -  | - | +  | -  | +   |
| Ab                          | +               | + | + | +  | - | -  | -  | -   |
| C                           | +               | - | - | +  | + | -  | -  | +   |
| ac                          | +               | + | - | -  | + | +  | -  | -   |
| Bc                          | +               | - | + | -  | + | -  | +  | -   |
| Abc                         | +               | + | + | +  | + | +  | +  | +   |

Tabela 3. 6 - Tabela de Sinais, para auxílio do cálculo do efeito fatorial

Fonte: Montgomery (1997).

A estimativa de qualquer efeito principal ou interação em um planejamento  $2^k$  é determinada pela multiplicação das combinações dos tratamentos na primeira coluna da tabela pelos sinais da coluna do efeito principal ou da interação correspondente, pela adição do resultado de modo a produzir um contraste e, então, pela divisão do contraste pela metade do número total de corridas no experimento. Para qualquer planejamento  $2^k$  com  $n$  réplicas, as estimativas dos efeitos são calculados a partir da equação 3.25.

$$Efeito = \frac{Contraste}{n2^{(k-1)}} \quad (\text{Equação 3. 25})$$

E a soma quadrática para qualquer efeito é dada pela equação 2.6

$$SQ = \frac{(Contraste)^2}{n2^k} \quad (\text{Equação 3. 26})$$

No entanto, nesta etapa do experimento, conforme salienta Galdámez (2002) e Montgomery (1997), alguns autores comentam que, embora seja simples estimar esses efeitos, muitas vezes é difícil definir qual é realmente o fator de controle que produz diferença significativa nas respostas e, na maioria das vezes, é necessária a utilização dos gráficos lineares (que representam os efeitos principais e de interação) e de probabilidade normal. Nessa fase do experimento, segundo Galdámez (2002), podem ser utilizados diferentes softwares para construir os gráficos (Excel, Statistica, Minitab, Statgraf). Montgomery (1997) recomenda que, para se concluir sobre os efeitos principais e de interação, é necessário aplicar técnicas de análise de variância (Anova) apresentada na seção (3.9.1).

De acordo com Devor *et al* (1992) *apud* Galdámez (2002), para representar e interpretar graficamente os efeitos principais e de interação, é necessário definir duas propriedades como se segue:

1. O sinal (+) indica a direção do efeito, isto é, se a resposta aumenta ou decresce com a variação do nível -1 para o nível +1.
2. A magnitude indica a intensidade do efeito.

A forma gráfica do efeito principal é representada pela **figura 3.4**. Esse gráfico linear ilustra a variação média das respostas em função da mudança no nível (-1,+1) de um fator ( $A$ ), mantendo-se os outros fatores inalterados.

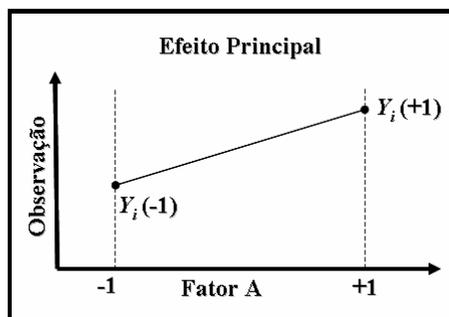


Figura 3. 4 – Gráfico dos Efeitos principais do Planejamento Fatorial  $2^k$

Fonte: Galdámez (2002).

Os gráficos dos efeitos de interação, segundo Galdámez (2002), descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores. Por exemplo, o gráfico da **figura 3.5 (a)** ilustra que o efeito provocado pela mudança do nível do fator *A* na resposta é independente do nível do fator *B*; portanto, não existe interação entre os fatores. O gráfico da **figura 3.5(b)** demonstra que o efeito provocado pela mudança de nível do fator *A* na resposta depende do nível do fator *B*; portanto, existe interação entre os fatores *A* e *B*.

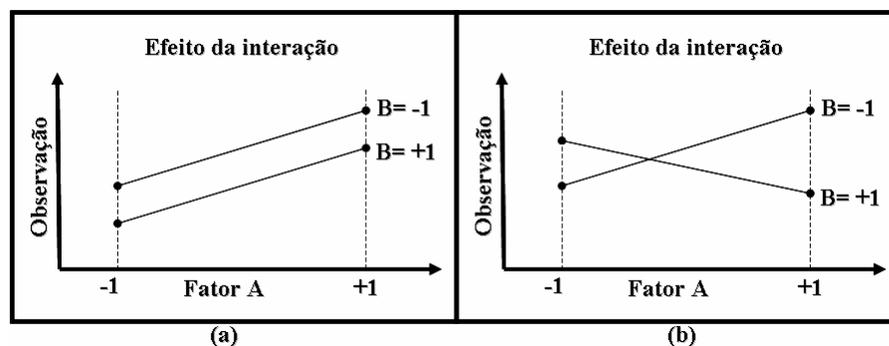


Figura 3. 5 - Gráfico dos Efeitos de Interação Para o Planejamento Fatorial  $2^k$

Fonte: Galdámez (2002) e Montgomery *and* Runger (2003).

O gráfico de probabilidade normal, conforme estabelecem Montgomery *and* Runger (2003), também pode ser utilizado para verificar a importância dos efeitos. Este gráfico é muito útil, segundo os autores, na verificação dos efeitos provenientes do planejamento fatorial fracionado, particularmente, quando muitos efeitos devem ser estimados.

Segundo Galdámez (2002), o uso dos gráficos de probabilidade normal é baseado no fato de que os efeitos principais ou de interação, que são desprezíveis, distribuem-se segundo uma distribuição normal centrada em zero e com variância  $\sigma^2$ , ou seja, esses efeitos tendem a se

concentrar ao longo de uma resta normal no gráfico. No entanto, se os pontos marcados no gráfico não parecerem, desviando-se, de algum modo, dessa linha imaginária, existem motivos para acreditar que esses dados obtidos não estão distribuídos de maneira normal; portanto, são efeitos significativos que devem ser analisados com mais detalhes. No gráfico da **figura 3.6**, tem-se um exemplo de planejamento fatorial  $2^3$ , onde se observa o afastamento dos pontos A, AC e ABC, que corresponde ao efeito A e às interações AC e ABC respectivamente, da reta normal, o que caracteriza a significância do efeito A e das interações AC e ABC.

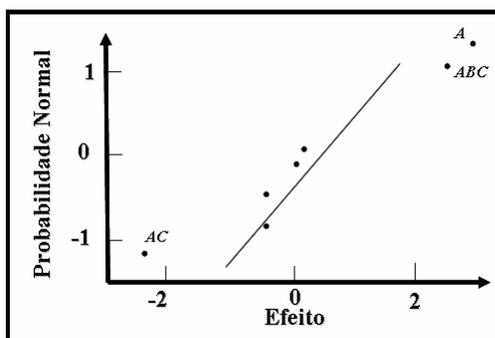


Figura 3. 6 - Gráfico de Probabilidade Normal dos Efeitos, um Exemplo Fatorial  $2^3$

Fonte: Montgomery *and* Runger (2003).

### 3.9.3 Análise Residual

Após realizar a análise de variância para os planejamentos fatoriais, segundo Buton (2002) e Werkema & Aguiar (1996b), é usual ajustar, aos dados, um modelo de regressão que relacione a variável resposta do experimento aos fatores e às interações que a análise de variância indicou como significativos. 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) prever 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; (v) validar as conclusões obtidas por meio da análise de variância; (vi) fornecer um modelo a ser utilizado, posteriormente, na fase de otimização da variável resposta. Montgomery (1997) acrescenta, ainda, que a análise de regressão pode ser utilizada para analisar dados que provenham de experimentos planejados ou não.

Werkema & Aguiar (1996b) ainda ressaltam que o modelo de regressão ajustado aos dados pode ser utilizado para gerar os valores preditos para a variável resposta, os quais são empregados para os cálculos dos resíduos associados ao experimento, que por sua vez terão a

função de validar ou não os resultados obtidos por meio da análise de variância. Segundo Montgomery *and* Runger (2003), é fácil obter os resíduos a partir de um planejamento  $2^k$ , através do ajuste de um modelo de regressão aos dados. Em um experimento  $2^2$ , quando a análise de variância indica que os efeitos principais dos fatores e o efeito da interação são significativos, o modelo de regressão que deve ser ajustado é:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (\text{Equação 3. 27})$$

onde  $x_1$  e  $x_2$  são variáveis que representam os níveis dos fatores  $A$  e  $B$ , respectivamente,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_{12}$  são os coeficientes de regressão e  $\varepsilon$  é um componente do erro aleatório (erro experimental).

Em outra situação, se a análise de variância identificar que apenas o efeito do fator  $A$  é significativo, o modelo a ser ajustado aos dados é dado por uma regressão linear simples, que, segundo Pizzolato (2002), é uma técnica estatística que ajusta, a um conjunto de dados, uma equação que representa o relacionamento linear entre uma variável dependente ( $Y$ ) e uma variável explicativa ( $X$ ). O modelo de regressão linear simples é dado pela simplificação da equação 3.27.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (\text{Equação 3. 28})$$

Conforme salientam Montgomery *and* Runger (2003) e Werkema & Aguiar (1996b), o coeficiente de regressão  $\beta_1$  é a metade da estimativa do efeito, visto que os coeficientes de regressão medem o efeito da variação unitária de  $x_1$  sobre a média de  $Y$  e a estimativa do efeito está baseada na variação de duas unidades de -1 a +1. Os autores afirmam que o coeficiente  $\beta_0$  pode ser determinado ao se calcular a média global de todas as observações da variável resposta durante o experimento. Esse modelo, segundo salientam Montgomery *and* Runger (2003), pode ser ajustado para a obtenção dos quatro pontos que formam os vértices dos quadrados no planejamento.

Pode-se observar que os resíduos de um planejamento fatorial  $2^k$  também são obtidos com o mesmo método demonstrado, anteriormente, para o  $2^2$ . Pizzolato (2002) afirma que este tipo de regressão é denominado por regressão linear múltipla, pois envolve mais de uma variável explicativa  $X$ , variável que representa os níveis dos  $k$  fatores, sendo seu modelo dado pela equação 3.29.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (\text{Equação 3. 29})$$

De acordo com Werkema & Aguiar (1996b), para o ajuste do modelo de regressão, é usual que as variáveis  $x_i$ , que representam os níveis dos fatores, sejam utilizadas sob a forma

codificada. Pois, segundo os autores, apresentam os seguintes benefícios: (i) facilidade computacional e maior acuracidade na estimação dos modelos de regressão; (ii) maior facilidade de interpretação das estimativas dos coeficientes do modelo. Para uma regressão linear múltipla segundo os autores os coeficientes  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  são determinados analogamente ao do modelo de regressão linear simples.

### 3.10 Meia-Fração dos Experimentos Fatoriais $2^k$ – Experimentos Fatoriais Fracionados $2^{k-p}$

Em muitos casos, é suficiente possível considerar apenas dois níveis para os fatores que afetam o processo de produção. Por exemplo, a temperatura em um processo químico pode ser fixada em um valor um pouco mais alto ou um pouco baixo, a quantidade de solvente em um processo industrial pode ser, ligeiramente, aumentada ou pode ser, ligeiramente, diminuída, etc.

O objetivo principal em se realizar experimentos é determinar se quaisquer mudanças nestes fatores afetam os resultados do processo de produção. A aproximação mais intuitiva para se estudar esses fatores seria variar os fatores de interesse em um projeto fatorial completo, onde são estudadas todas as possíveis combinações dos fatores envolvidos; porém, o número de corridas experimentais aumentará exponencialmente de acordo com a elevação da quantidade de fatores envolvidos no processo. Por exemplo, se o processo tivesse 7 fatores a serem estudados, o número necessário de corridas experimentais seria de  $2^7 = 128$  e, se no processo houvesse 10 fatores, seria necessário à realização de  $2^{10} = 1024$  corridas experimentais. Ao se realizar muitas corridas experimentais, o experimento pode se tornar, em alguns casos, muito caro e com um elevado tempo de execução, o que, freqüentemente, pode tornar o experimento inviável. Nestas condições, o fatorial fracionário surge como uma possibilidade de diminuição do número de corridas experimentais, o que implica em uma economia de tempo e custos e, conseqüentemente, em um aumento da eficiência do planejamento.

Montgomery *and* Runger (2003) e Werkema & Aguiar (1996b) salientam que os fatoriais fracionados são muito empregados nos estágios iniciais da experimentação quando há um numero muito grande de fatores a serem investigados, sendo, portanto, desejável avaliar, de forma mais superficial e com um mínimo de tempo e custo, os efeitos deste grande número de fatores sobre a variável resposta. Afim de apresentar as justificativas para o emprego do planejamento fatorial fracionado nas fases iniciais da experimentação, bem como em etapas de confirmação, onde já são conhecidos, por exemplo, a importância ou não de certas interações, se fez uso de uma

descrição sobre um projeto fatorial  $2^7$ , utilizado por Box *et al.* (1978) para, exatamente, introduzir os projetos fracionados.

A **tabela 3.6** apresenta o número total de testes possíveis em um experimento com 7(sete) fatores a 2 (dois) níveis cada, sem replicações. Este projeto fatorial do tipo  $2^7$ , segundo Box *et al.* (1978), pode apresentar "redundância em relação a um número excessivo de interações que podem ser estimadas e, algumas vezes, em um número excessivo de variáveis que são estudadas". Isto quer dizer que a realização de todos estes ensaios, em certos cenários experimentais, pode resultar em perda de tempo, recursos e mesmo objetividade no tratamento daqueles fatores que são, verdadeiramente, importantes.

| Média geral | Efeitos Principais | Interações |           |           |           |           |           |
|-------------|--------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|             |                    | 2 fatores  | 3 fatores | 4 fatores | 5 fatores | 6 fatores | 7 fatores |
| 1           | 7                  | 21         | 35        | 35        | 21        | 7         | 1         |

Tabela 3. 7- Número de testes contidos em um planejamento Fatorial  $2^7$

Fonte: Box *et al.* (1978)

Montgomery (1997) e Montgomery and Runger (2003) apresentam um detalhamento interessante sobre o projeto fatorial completo com número elevado de variáveis, que pode ser expandido para o projeto contido na tabela da **figura 3.8**. Por exemplo, somente 7 dos 127 graus de liberdade deste projeto correspondem aos efeitos principais. Dos efeitos provocados por interações entre 2 fatores, somente 21 graus de liberdade são necessários para determiná-los, o mesmo ocorrendo para as interações de 3 fatores, onde 35 graus de liberdade são suficientes. Neste sentido, é importante ter em mente que as interações de ordem mais alta (interações de três ou mais fatores), em geral, não são significativas, podendo ser negligenciadas.

Este fato também é verificado por Mont`Alvão (1997), que afirma que ao se elevar o número  $k$  de fatores, o número de interações de ordem mais elevada aumenta consideravelmente. O número total de efeitos (principais e das interações) de um projeto fatorial completo que contém  $k$  fatores é sempre igual a  $(2^k - 1)$ , ou seja, é sempre igual ao número total de tratamentos menos 1. De acordo com Montgomery *and* Runger (2003), frequentemente, há pouco interesse nas interações de ordens altas, particularmente no início do estudo de processo ou de um sistema. Segundo os autores, ao se considerar que certas interações de ordens mais altas são negligenciáveis, então um planejamento fatorial fracionado, envolvendo menos corridas que um

conjunto completo de  $2^k$  corridas poderá ser usado para obtenção de informações sobre os efeitos principais e as interações de ordem mais baixa. Segundo Mont'Alvão (1997), este fato é devido aos efeitos das interações de ordem mais elevada possuírem valores pequenos que, em geral, são muitas vezes destituídos de qualquer significado. Desta forma, não é necessário executar todos os tratamentos previstos em um planejamento fatorial completo, pois estes efeitos das interações de ordem mais elevada foram considerados desprezíveis, não sendo necessário estimá-los.

De modo geral, segundo Werkema & Aguiar (1996b), afirmam que “*um planejamento fatorial completo  $2^k$  pode ser definido em  $2^p$  ( $p < k$ ) frações. Cada uma destas frações recebe a denominação de experimento fatorial fracionado  $2^{k-p}$ ”.*

Assim, pode-se argumentar que projetos fatoriais com elevado número de variáveis, normalmente utilizados em etapas iniciais de experimentação, podem ser minimizados, ou melhor, fracionados. Este fracionamento, conforme será apresentado a seguir, tem como base três idéias-chave, discutidas por Box *et al* (1978) e Montgomery (1997), e aqui apresentadas:

- **Princípio da esparcividade (dispersividade) dos efeitos:** quando existem muitas variáveis, o sistema ou processo é comandado, preponderantemente, por alguns dos efeitos principais e interações de baixa ordem;
- **Propriedade de projeção:** projetos fatoriais fracionados podem ser projetados (visualmente) a partir de projetos potentes (grandes), resultando em um subconjunto de fatores significativos;
- **Experimentação seqüencial:** possibilidade de combinação de rodadas de dois (ou mais) projetos fatoriais fracionados para construir, seqüencialmente, um projeto de maiores dimensões, a fim de estimar, com maior precisão, os efeitos dos fatores e interações de interesse.

Utilizando-se como base os três princípios abordados anteriormente, são descritos outros aspectos que devem ser considerados ao se construir experimentos fatoriais fracionados. Considere um estudo de um projeto fatorial  $2^3$ , onde se possui 3 fatores de controle (A, B e C) em que a equipe responsável pelo experimento não deseje realizar as oito combinações devido a restrições financeiras. Porém, neste caso, é possível realizar um experimento com quatro (metade) observações ( $2^3/2=2^{3-1}=2^2=4$ ). Este exemplo é apresentado por Montgomery (1997) e Montgomery *and* Runger (2003).

Considere a **tabela 3.9**, onde aparecem todas as combinações possíveis do experimento fatorial completo  $2^3$ . A ordem padrão, estabelecida nas colunas tabela 3.8 foi estimada utilizando

o método apresentado na seção 3.9.2. Por conveniência, as combinações (linhas da matriz) foram separadas pelos sinais positivos e negativos da coluna de interação de maior ordem, ou seja, pela interação ABC. Esta coluna, de acordo com Galdámez (2002), é denominada de relação definidora ou geradora (*I*) desta fração particular do experimento. Ainda conforme o autor, a equipe responsável por este tipo de experimento deve optar pela execução das combinações referentes à parte positiva (*a, b, c e abc*), o que é mais usual, ou executar a outra parte (*ab, ac, bc e (I)*). De acordo com Montgomery (1997), a tabela 3.8 apresenta os efeitos principais dos 3 fatores na metade superior e os tratamentos responsáveis pelos efeitos de interação de segunda ordem, na metade inferior. Ao se utilizar meia fração (50% do experimento), segundo o autor, é necessário escolher um efeito para ser confundido com a diferença das duas frações. A interação de mais alta ordem, neste caso ABC, é geralmente escolhida para ser confundida.

| Combinações dos Tratamentos | Efeito Fatorial |   |   |    |   |    |    |     |
|-----------------------------|-----------------|---|---|----|---|----|----|-----|
|                             | I               | A | B | AB | C | AC | BC | ABC |
| <i>a</i>                    | +               | + | - | -  | - | -  | +  | +   |
| <i>b</i>                    | +               | - | + | -  | - | +  | -  | +   |
| <i>c</i>                    | +               | - | - | +  | + | -  | -  | +   |
| <i>abc</i>                  | +               | + | + | +  | + | +  | +  | +   |
| <i>ab</i>                   | +               | + | + | +  | - | -  | -  | -   |
| <i>ac</i>                   | +               | + | - | -  | + | +  | -  | -   |
| <i>bc</i>                   | +               | - | + | -  | + | -  | +  | -   |
| <i>(I)</i>                  | +               | - | - | +  | - | +  | +  | -   |

Tabela 3. 8 - Tabela de sinais para um Planejamento Fatorial 2<sup>3</sup>

Fonte: Montgomery *and* Runger (2003).

A seguir, com objetivo de ilustrar o processo de planejamento experimental com a técnica fatorial fracionado, será utilizada a parte positiva do experimento apresentado na tabela 3.8. Com a metade superior dos tratamentos, estimam-se os efeitos principais utilizando as equações abaixo:

$$l_A = \frac{1}{2}(a - b - c + abc) \quad (\text{Equação 3. 30})$$

$$l_B = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc) \quad (\text{Equação 3. 31})$$

$$l_C = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (\text{Equação 3. 32})$$

Com a metade inferior, estimam-se os efeitos de interação de dois fatores utilizando as equações abaixo:

$$l_{BC} = \frac{1}{2}(a - b - c + abc) \quad (\text{Equação 3. 33})$$

$$l_{AC} = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc) \quad (\text{Equação 3. 34})$$

$$l_{AB} = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (\text{Equação 3. 35})$$

Comparando os termos das duas frações, verifica-se que  $l_A = l_{BC}$ ,  $l_B = l_{AC}$  e  $l_C = l_{AB}$  por conseguinte, o que não é possível diferenciar os efeitos de  $A$  e  $BC$ ,  $B$  e  $AC$ , e  $C$  e  $AB$ , significando que, ao estimarem-se os efeitos principais dos fatores  $A$ ,  $B$  e  $C$ , está se estimando, na realidade, o efeito de  $A+BC$ ,  $B+AC$  e  $C+AB$  (MONTGOMERY, 1997 e MONTGOMERY and RUNGER, 2003). E segundo os autores esta propriedade é conhecida por confundimento.

Este confundimento é resultado da diminuição do número de ensaios, o que acaba resultando em um efeito indesejável da propriedade de projeção, ou seja, certos fatores ou interações de fatores não poderão ser individualizados para se identificar quais deles, realmente, é a fonte de variação. (LEITÃO 2000)

A estrutura de confundimento de um efeito principal ou de interação em um experimento pode ser determinada por meio da multiplicação do efeito com a relação definidora. A multiplicação de qualquer efeito pela relação definição resulta nos pares associados para aquele efeito, ou seja, determina a estrutura de confundimento do efeito principal, que pode ser obtida conforme se segue, para o efeito principal e tem-se:

$$A = A \times ABC = A^2BC = BC$$

Visto que  $A \times I = A$  e  $A^2 = I$  as estruturas de confundimento de  $B$  e  $C$  são:

$$B = B \times ABC = AB^2C = AC, \text{ e } C = C \times ABC = ABC^2 = AB$$

Nota-se que não existe confundimento entre os efeitos principais, porém essas informações estão confundidas como os efeitos das interações de dois fatores. Sendo assim, resolução que será utilizada no experimento, segundo Galdámez (2002), torna-se um aspecto importante a ser considerado. A nomenclatura resolução, segundo Leitão (2002), deve ser utilizada para se classificar os tipos possíveis de confundimento, ou seja, conforme salienta

Montgomery (1997), a resolução de um experimento fatorial fracionado determina o padrão de confundimento entre os efeitos dos fatores. O autor ainda ressalta que as resoluções de maior interesse são as de número 3, 4 e 5, que são representadas, normalmente, pelos respectivos números romanos III, IV e V. O autor recomenda que, nos experimentos, deve se utilizar a maior resolução possível, pois com isso, é possível desprezar os efeitos de mais alta ordem. A seguir são apresentadas as definições de resolução III, IV e V (MONTGOMERY, 1997 e MONTGOMERY *and* RUNGER, 2003):

**Planejamento de resolução III:** são planejamentos em que nenhum efeito principal está associado com qualquer outro efeito principal; porém, efeitos principais estão associados com interações de segunda ordem e algumas interações de segunda ordem podem estar associadas entre si. O planejamento  $2^{3-1}$ , com a relação definidora  $I=ABC$ , é um planejamento de resolução III. Geralmente, emprega-se um subscrito numeral romano para indicar a resolução do planejamento. Logo, essa meia fração é um planejamento  $2_{III}^{3-1}$ .

**Planejamento de resolução IV:** são planejamentos em que nenhum efeito principal está associado com qualquer outro efeito principal ou com interações de segunda, ordem; porém, interações de segunda ordem estão associadas entre si. O planejamento  $2^{4-1}$ , com a relação definidora  $I=ABCD$ , é um planejamento de resolução IV ( $2_{IV}^{4-1}$ ).

**Planejamento de resolução V:** são planejamentos em que nenhum efeito principal ou qualquer interação de segunda ordem estão associados com qualquer outro efeito principal ou com interações de segunda ordem; porém, interações de segunda, ordem estão associadas com interações de terceira ordem. O planejamento  $2^{5-1}$ , com a relação definidora  $I=ABCDE$ , é um planejamento de resolução V ( $2_V^{5-1}$ ).

De acordo com Galdámez (2002), em alguns casos, dependendo do número de fatores que são investigados, uma fração menor de combinações é necessária para realizar os experimentos fatoriais. As frações menores, segundo Montgomery *and* Runger (2003), frequentemente, fornecerão quase tanta informação útil quanto antes e com mais economia. Em geral, um planejamento  $2^k$  pode ser corrido em uma fração  $1/2^p$ , denominado de fatorial fracionado  $2^{k-p}$ . Deste modo, quando se deseja reduzir a 1/4 do experimento completo, tem-se um planejamento  $2^{k-2}$ , quando se deseja reduzir a 1/8 do experimento completo, tem-se um planejamento  $2^{k-3}$ , e assim por diante.

Tomando-se, como exemplo, a possibilidade de realização de apenas 1/4 do experimento fatorial completo, conhecido como experimento fatorial  $2^{k-2}$ , segundo Galdámez (2002), o experimento pode ser construído inicialmente com as combinações de tratamento ou colunas da matriz de um planejamento fatorial com  $k-2$  fatores. Em seguida, são adicionadas duas colunas com as interações escolhidas, apropriadamente, pela equipe responsável por conduzir os experimentos, que incluem os primeiros  $k-2$  fatores. Uma característica importante desse experimento, conforme estabelecem Galdámez (2002) e Montgomery *and* Runger (2003), é a necessidade de determinar duas relações definidoras. Conforme se eleva a quantidade de fatores, o número de frações também pode ser aumentado. Na literatura especializada (Box *et al*, 1978; Montgomery 1997; Montgomery *and* Runger 2003 e etc) sobre as técnicas de planejamento e análise de experimentos, estão disponíveis o número de combinações e as estruturas de confundimento para cada tipo de fração desejada.

Ao mesmo tempo, ressalta Galdámez (2002) que a análise estatística e descritiva (gráficos lineares e de probabilidade normal) dos efeitos e das interações dos fatores segue os mesmos princípios apresentados, anteriormente (ver seção 3.9), para um experimento  $2^k$ .

### 3.11 Otimização Multivariada

Shyy *et al* (2001) afirmam que o processo de otimização de processo deve ser dividido em duas partes: (i) uma primeira fase de aproximação, onde são gerados polinômios ou modelos para cada resposta a partir das informações obtidas; (ii) uma segunda fase, onde se procura estabelecer uma solução global. Este fato segundo, Ribeiro *et al.* (2000), é devido ao fato de que muitos processos industriais e produtos são avaliados por mais de uma característica de qualidade. Para selecionar o melhor projeto e os melhores parâmetros de operação, é necessário considerar todas as medidas de qualidade simultaneamente, o que é conhecido, segundo o autor, é conhecido por otimização multivariada. Para Chiao & Hamada (2001), analisar, separadamente, experimentos multivariados pode levar a recomendações conflitantes em relação aos níveis dos fatores importantes, porque um nível de um fator pode melhorar uma resposta e piorar outra. Além disso, quando as correlações entre as respostas são ignoradas, pode-se deixar de encontrar ajustes dos parâmetros que, simultaneamente, melhorem a qualidade das respostas.

Segundo Wurl & Albin (1999), otimizar processos de manufatura em relação a apenas uma variável em muitos casos, levará a valores não ótimos das características que não foram

consideradas. É desejável encontrar a otimização global ou o melhor compromisso entre as características do produto simultaneamente. Vários métodos quantitativos têm sido desenvolvidos para combinar as respostas múltiplas em funções únicas e procurar encontrar o compromisso ótimo. Por compromisso ótimo entende-se encontrar níveis de operação dos parâmetros de projeto de tal modo que cada característica do produto esteja o mais próximo possível de seu valor ideal.

De acordo com Derringer *and* Suich (1980) e Shyy *et al* (2001) o modelo de otimização multivariada pode ser formulado em três situações básicas: quanto maior, melhor a meta de maximizar é a função objetiva; quanto menor, melhor a meta de minimizar é a função objetiva e no alvo, onde a meta é atingir um target para a função objetiva.

Para o modelamento matemático, segundo Derringer *and* Suich (1980), de tais situações, deve-se considerar a seguinte função:

$$Y_{ij} = f_i(X_1, X_2, \dots, X_p) + \epsilon_{ij} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, k \\ j = 1, 2, \dots, n_i \end{array} \quad (\text{Equação 3. 36})$$

Onde  $f_i$  denota a relação funcional entre  $Y_{ij}$  e os  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , de acordo com os autores, esta função pode diferir para cada  $Y_{ij}$  e que  $f_i$  representa esta relação, excluindo o termo que representa o erro intrínseco  $\epsilon_{ij}$ . Desconsiderando-se este erro à função, existe uma relação de cada  $X$  com a resposta  $Y_{ij}$ , dando origem a uma nova função:

$$\eta_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_p) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (\text{Equação 3. 37})$$

Na prática,  $f_i$  é tipicamente desconhecido. Os autores afirmam que o procedimento usual é aproximar  $f_i$  de uma função polinomial. Os autores, então, estimaram  $\eta_i$  por  $\hat{Y}_i$ , baseando-se em técnicas de regressão.

A função desejabilidade envolve a transformação de cada variável resposta estimada ( $\hat{Y}_i$ ) para um valor de desejabilidade ( $d_i$ ) que varia de 0 a 1. O aumento no valor de  $d_i$  acarreta um aumento na resposta. Deste modo, conforme os autores, a desejabilidade individual é calculada através da média geométrica das desejabilidades ( $d_i$ ):

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_k)^{1/k} \quad (\text{Equação 3. 38})$$

Nota-se da equação 3.38 que, quando uma das desejabilidades ( $d_i$ ) for igual a zero,  $D$  assume um valor igual a zero que, segundo os autores, caracteriza um produto inaceitável.

Existem duas formas de abordagem matemática para as três situações citadas, anteriormente para o modelamento da resposta otimizada .

No primeiro modo (maximização/minimização), as transformações são dadas pelas seguintes equações e, portanto, a desejabilidade ( $d_i$ ) assume os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0 && \text{para } \hat{Y}_i \leq Y_{i^*} \\
 d_i &= \left[ \frac{\left( \hat{Y}_i - Y_{i^*} \right)}{\left( Y_i^* - Y_{i^*} \right)} \right]^r && \text{para } Y_{i^*} < \hat{Y}_i < Y_i^* \\
 d_i &= 1 && \text{para } \hat{Y}_i \geq Y_i^*
 \end{aligned}
 \tag{Equação 3. 39}$$

Observa-se que quando  $\hat{Y}_i \leq Y_{i^*}$ , a desejabilidade assume um valor nulo que, como dito anteriormente, retrata uma condição de produto inaceitável. Porém, quando  $\hat{Y}_i$ , se encontra no seguinte intervalo  $Y_{i^*} < \hat{Y}_i < Y_i^*$ , a desejabilidade assume um valor entre zero e um, sendo dependente do valor r que é ajustado, como pode ser visto no gráfico da **figura 3.7**.

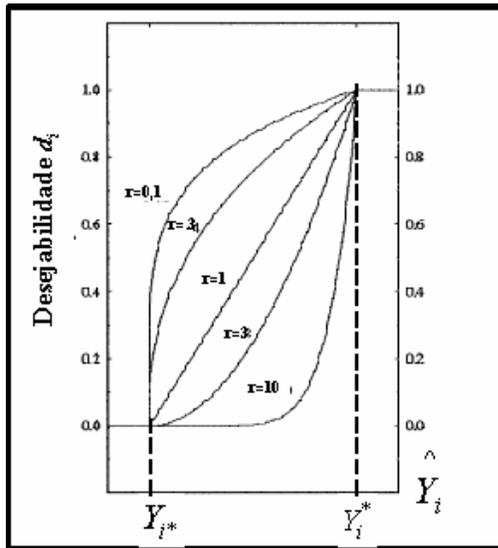


Figura 3. 7– Gráfico de definição da desejabilidade (maximizar/minimizar)

Fonte: Derringer and Suich, (1980) e Shyy et al (2001)

Para a segunda situação, as transformações da função  $d_i$  são realizadas com o intuito de obter uma resposta no alvo (target) e podem ser calculadas pelo gráfico da **figura 3.8**.

$$d_i = \left[ \frac{(\hat{Y}_i - Y_{i^*})}{(c_i - Y_{i^*})} \right]^s \quad \text{para} \quad Y_{i^*} \leq \hat{Y}_i \leq c_i$$

$$d_i = \left[ \frac{(\hat{Y}_i - Y_i^*)}{(c_i - Y_i^*)} \right]^t \quad \text{para} \quad c_i \leq \hat{Y}_i \leq Y_i^*$$

$$d_i = 0 \quad \text{para} \quad \hat{Y}_i < Y_{i^*} \quad \text{ou} \quad \hat{Y}_i > Y_i^*$$

(Equação 3. 40)

Nesta situação, o valor  $Y_{i^*}$  é o mínimo aceitável para  $\hat{Y}_i$  e  $Y_i^*$  o máximo. Valores fora deste intervalo produzem produtos não aceitáveis, ou seja, com desejabilidade igual à zero. Como na situação anterior, os valores de  $s$  e  $t$  também são ajustados, permitindo, então, o ajuste da desejabilidade, e isto, segundo Derringer *and* Suich (1980), pode ser visto no gráfico da **figura 3.8**.

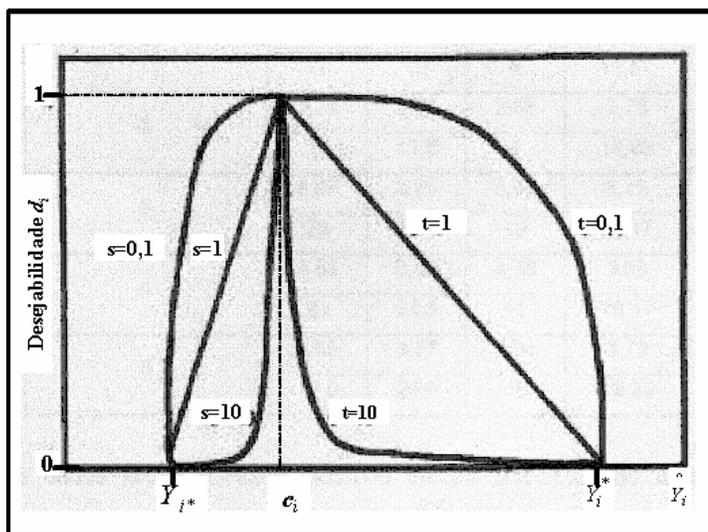


Figura 3. 8 – Gráfico de definição da deserabilidade (Alvo)

Fonte: Derringer and Suich, (1980).

A otimização simultânea de muitas respostas é frequentemente realizada por aproximações baseadas em situações de perda ou ganho. Em tais aproximações, o procedimento

consiste em avaliar numerosas formulações até encontrar qual, dentre todas, possui melhor desempenho conforme as proposições iniciais. A função de desabilidade é considerada como uma melhoria nestes tipos de aproximações e, usualmente, necessita de poucas formulações a serem avaliadas, produzindo, também, resultados melhores. Além disso, a mesma é capaz de plotar a superfície de desabilidade que determina a sensibilidade para pequenas mudanças nas variáveis independentes (DERRINGER AND SUICH, 1980).

### **3.12 Considerações Finais**

A técnica DOE, em particular, o experimento fatorial completo ou fracionado, junto com a metodologia de otimização das respostas quando possui mais de uma variável resposta a ser analisada, é uma ferramenta preciosa e indispensável para pesquisadores que se vêm envolvidos com realizações de ensaios experimentais e que buscam otimizar situações em ambientes complexos. O DOE abrevia a obtenção de resultados, diminuindo, sensivelmente, o número de experimentos, além de reduzir o grau de incerteza das informações obtidas durante a realização do experimento.

## 4. Processo de Soldagem MIG Pulsado

O capítulo quatro apresenta uma revisão bibliográfica sobre o Processo de Soldagem MIG Pulsado, assim como suas vantagens e benefícios. Descreve, também, a origem, as variáveis do processo, bem como as características elétricas de transferência metálica no processo MIG/MAG.

### 4.1 Considerações Iniciais

De acordo com Ribeiro (2002), Saunders (1997) e Wainer *et al.* (1995), o processo de soldagem GMAW – *Gas Metal Arc Welding* ou MIG (*Metal Inert Gas*)/MAG (*Metal Active Gas*) – como também é conhecido, tem como princípio a utilização de um arco elétrico como fonte de calor para o aquecimento da superfície a ser soldada e um eletrodo metálico alimentando continuamente o processo. Ribeiro (2002) ainda ressalva que o calor gerado pelo arco funde a ponta do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a poça de fusão, a qual é protegida dos efeitos nocivos do ar atmosférico por intermédio de um gás de proteção proveniente de uma fonte externa.

Quites e Dutra (1979) afirmam que este gás de proteção, segundo sua natureza e composição, tem influência preponderante nas características do arco, no tipo de transferência do metal do eletrodo a peça, na velocidade de soldagem, nas perdas por projeções, na penetração e na forma externa da solda. Por outro lado, os autores ainda ressaltam que o gás também influencia nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e à porosidade, bem como na facilidade de execução da soldagem nas diversas posições. Os gases nobres (processo MAG) são preferidos por razões metalúrgicas e o CO<sub>2</sub> puro (processo MIG) por razões econômicas.

O processo MIG/MAG, conforme salienta Saunders (1997), é adequado à maioria dos metais que podem ser soldados. Entretanto Wainer *et al.* (1995) apresenta os aços-carbono, os aços de baixa, média e alta liga, os aços inoxidáveis, o alumínio e suas ligas, o magnésio e suas ligas, e cobre e suas ligas como os metais mais utilizados neste processo. Graig (1987)

complementa esta informação, descrevendo que, ao se utilizar este processo em materiais de alta liga e materiais sensíveis ao calor, os quais eram considerados de difícil soldagem, obtém-se êxito, apesar da sua complexidade. Saunders (1997) e Wainer *et al.* (1995) também salientam que o processo pode ser semi-automático ou totalmente automático, ou ainda, conforme Ribeiro (2002), ser realizado com uma tocha de soldagem sendo operada manualmente por um operador. Conforme Ribeiro (2002), o processo de soldagem MIG/MAG pode ser empregado em processos de fabricação, em manutenção de equipamentos. A **figura 4.1** mostra esquematicamente o processo.

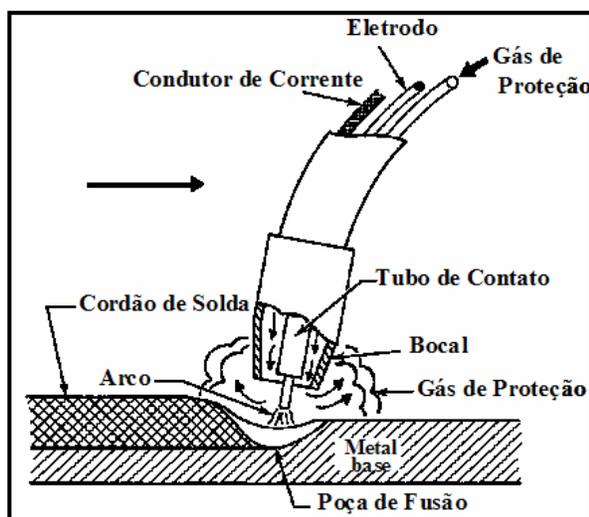


Figura 4. 1 – Processo de soldagem MIG/MAG

Fonte: Ramos (1995), Saunders (1997) e Wainer *et al* (1995) .

O processo MIG/MAG, conforme salienta Saunders (1997) é principalmente aplicado em soldagens de alta produtividade e, de acordo com Davies (1993), vem crescendo e está substituindo alguns dos mais tradicionais métodos de soldagem por causa da redução da temperatura de entrada, o que conseqüentemente reduz as distorções. O processo MIG/MAG é visto como um processo em crescente adoção pelas empresas, decorrente de sua eficiência e baixo custo. Durante os últimos anos, o processo tem se desenvolvido rapidamente como um eficiente método de manufatura para a produção de vários tipos de estruturas soldadas (DAVIES (1993); SAUNDERS (1997); STENBACKA *and* PESSON (1989) e WAHAD *and* PAINTER (1997)). Davies (1993) afirma que deve ser o principal processo de soldagem a ser estudado nos próximos anos. Sulivam (1998) relata que este processo tem sido reconhecido pelos especialistas

como a tecnologia que marcou o início da soldagem moderna, sendo hoje em dia utilizado pelas principais companhias. Saunders (1997) ainda salienta que o MIG/MAG é um processo econômico que requer pequeno ou nenhuma limpeza do cordão de solda.

## 4.2 Uma Breve Revisão da História do Processo MIG/MAG

De acordo com Saunders (1997) e Wainer *et al.* (1995), os primeiros trabalhos com este processo foram feitos com gás ativo em peças de aço no início dos anos 30. Pois, segundo os autores, foram realizadas algumas experiências neste período, utilizando um gás inerte para proteger a zona do arco elétrico e a poça de fusão, que comprovava que assim se conseguia melhores propriedades do metal depositado. Entretanto, a ampliação do processo com atmosferas externas protetoras foi inviabilizado pelo desenvolvimento dos eletrodos revestidos neste mesmo período. Somente após a II Guerra Mundial, voltou a ser viabilizado, primeiro para a soldagem de magnésio e suas ligas e, em seguida, para os outros metais, sempre, porém com gás inerte. Algum tempo depois, foi introduzido, no lugar do argônio, o CO<sub>2</sub>, parcialmente ou totalmente, na soldagem dos aços.

Sulivam (1998) afirma que a concepção do método se deu por um grupo de pesquisadores (Muller, Gibson e Anderson) da Airco, localizada em New Jersey, EUA, que possuem o mérito pela patente. A visão do novo processo iniciou-se com a compreensão de que a polaridade, a velocidade de alimentação do eletrodo e a densidade de corrente eram fatores críticos na forma como as transferências metálicas ocorriam. Segundo o autor, o objetivo principal era a criação de um processo que combinasse a suavidade de arco e a ausência quase que total de respingos, inerentes ao processo TIG (*Tungstênio Inert Gas*), com a facilidade de uso do processo com eletrodos revestidos.

Em sua fase inicial de concepção do método, a utilização de correntes com altas densidades e eletrodos com pequenos diâmetros era freqüente, além da utilização de um gás inerte como proteção. Por este motivo, o processo ficou inicialmente denominado de MIG (Metal Inert Gas). A partir da evolução do método, introduziu um gás ativo no processo que passou a ser denominado de MAG (Metal Active Gas). Desta forma, genericamente, convencionou-se chamar o processo de MIG/MAG. Além disso, foi introduzida a prática da união de peças, utilizando baixas densidades de correntes pulsadas e, ainda, utilizando uma mistura de gases (RIBEIRO, 2002).

### 4.3 Características Gerais

As vantagens e limitações do processo são apresentadas a seguir:

#### 4.3.1 Vantagens

- Processo semi-automático bastante versátil, podendo ser adaptado facilmente para a soldagem automática; possibilidade de utilização de robôs no processo (WAINER *et al*, 1995); também pode ser realizado com uma tocha de soldagem, sendo operada manualmente por um operador, que pode ser facilmente treinado para soldar em todas as posições (RIBEIRO, 2002);
- Alimentação contínua do eletrodo (WAINER *et al*, 1995);
- Versatilidade da soldagem que pode ser executada em todas as posições (LYTTLE, 1983 e WAINER *et al*, 1995);
- Alta produtividade devido à elevada velocidade de soldagem (LYTTLE, 1983 e WAINER *et al*, 1995);
- Presença de maiores ciclos ativos (*Duty Cycles*), ou seja, tempo de soldagem / tempo de fabricação em relação ao eletrodo revestido (STENBACKA and PESSON, 1989);
- Altas taxas de deposição devido à densidade de corrente na ponta do eletrodo (WAINER *et al*, 1995). Normalmente, 92 a 98% do material consumido se torna metal depositado, dependendo do tipo de proteção utilizado e das regulagens da corrente e da tensão. Isto pode ser observado ao comparar-se aos processos com eletrodo revestido e eletrodo tubular (LYTTLE, 1983);
- Impacto econômico favorável em relação a outros processos e a excelente qualidade obtida nos cordões de solda (LYTTLE, 1983);
- Problemas reduzidos de distorções e tensões residuais (WAINER *et al*, 1995);
- Possibilidade de controle da penetração e diluição durante a soldagem (WAINER *et al*, 1995).

### 4.3.2 Limitações

- Alta complexidade do processo, que envolve os quatro estados da matéria: sólido, líquido, gasoso e plasmático. Várias características inerentes ao processo de soldagem MIG/MAG ainda merecem ser melhor esclarecidas (WAHAB *and* PAINTER, 1997 e ZHU *et al*, 1997);
- Maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente no caso de aços temperáveis (WAINER *et al*, 1995);
- Dificuldade de operações em locais de difícil acesso, pois o bocal precisa ficar próximo do metal-base a ser soldado (Wainer *et al*, 1995);
- Aumento das projeções de gotas do metal durante a soldagem, associado a uma grande emissão de raios ultravioletas (WAINER *et al*, 1995);
- Equipamento de soldagem mais caro e complexo que o do processo de eletrodo revestido (WAINER *et al*, 1995);
- Equipamento menos portátil que o do processo de eletrodo revestido (WAINER *et al*, 1995);
- Limitações sobre o controle da transferência metálica, o que torna o processo muito estável e de difícil controle (RIBEIRO, 2002);
- Restrições quanto ao uso na soldagem de chapas finas, decorrente do alto aporte de calor apresentado (RIBEIRO, 2002).

## 4.4 Equipamentos

Os equipamentos básicos para a soldagem MIG/MAG são mostrados esquematicamente na **figura 4.2**. Dentre os principais equipamentos observados na figura destacam-se:

A fonte de energia pode ser um gerador ou um retificador, ambos com características potenciais constantes. A soldagem pelo processo MIG/MAG é geralmente feita em corrente contínua, que pode até ser pulsada. Há estudos para desenvolver o processo para corrente alternada (QUITES *and* DUTRA ,1979 e WAINER *et al*, 1995).

O alimentador de eletrodo é ligado à fonte de energia e possui controle para a velocidade de alimentação; a velocidade, junto com a tensão selecionada na fonte determina o valor da corrente de soldagem (QUITES *and* DUTRA ,1979 e WAINER *et al*, 1995).

A pistola pode ser refrigerada a ar ou água, dependendo da escolha da corrente de soldagem, do tipo de gás de proteção e do tipo junta (Wainer *et al*, 1995 e Quites *and* Dutra, 1979). A pistola, segundo Saunders (1997), executa três funções: administra poder elétrico, oferece a proteção do gás para a região do arco, guia o eletrodo consumível.

O reservatório de gás de proteção é um cilindro de aço com o gás adequado à soldagem, acoplado a uma válvula reguladora de pressão a um medidor e controlador de vazão (QUITES *and* DUTRA, 1979 e WAINER *et al*, 1995)

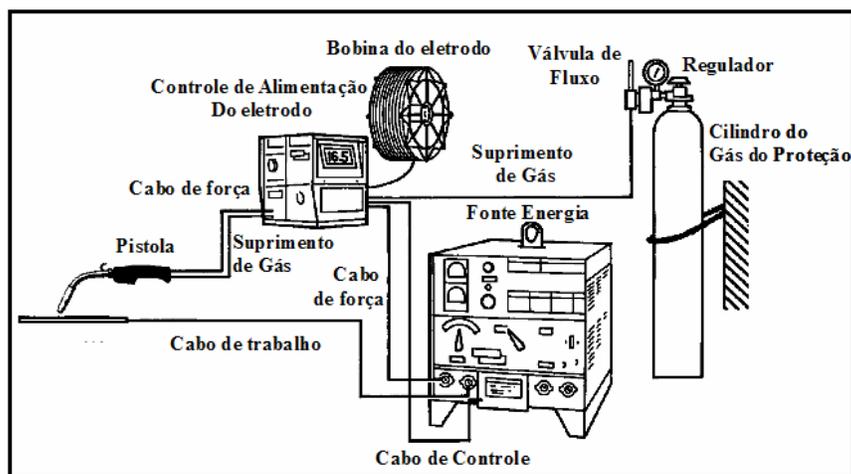


Figura 4. 2 – Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG

Fonte: Saunders (1997).

## 4.5 Variáveis do Processo

A soldagem MIG/MAG é um processo que apresenta grande número de variáveis a serem controladas. E de acordo com Wahab *and* Painter (1997) trata-se de um processo complicado com muitos parâmetros inter-relacionados, que influenciam na qualidade da junta soldada. Os autores definem a corrente de soldagem, tensão (voltagem) e velocidade da soldagem como as variáveis de maior importância ao processo. As outras variáveis do processo tal como o comprimento e diâmetro do eletrodo, gás de proteção e velocidade de alimentação são considerados fatores secundários pelos autores. Ribeiro (2002), Wainer *et al*, (1995), Quites *and* Dutra (1979) afirmam que existem diversas variáveis que influenciam nas características do cordão de solda, dentre elas os autores também destacam aquelas apresentadas por Wahab *and* Painter (1997). Portanto, serão apresentadas as características destacadas pelos autores citados.

### 4.5.1 Corrente de Soldagem

Segundo Ribeiro (2002), a corrente de soldagem tem influência direta na taxa de decomposição, na transferência metálica e nas características geométricas do cordão. Sua escolha correta, segundo o autor, dependerá da espessura das peças a serem unidas, do diâmetro do eletrodo e das características desejadas nos cordões de solda. E de acordo com Wainer *et al*, (1995), a corrente pode ser uma corrente contínua com polaridade reversa ou direta.

Uma consideração importante realizada por Ribeiro (2002), com relação a corrente de soldagem, é o fato de se poder manipular a mesma através de pulsos, atingindo-se com isto, correntes médias inferiores à corrente de transição, fato esse que permite a soldagem por spary em chapas finas e em posições não planas.

### 4.5.2 Tensão (Voltagem)

Conforme salienta Ribeiro (2002), a tensão é considerada como um dos mais influentes parâmetros no processo por afetar tanto o modo da transferência metálica, quanto a geometria do cordão de solda. A tensão de soldagem e o comprimento do arco, segundo o autor, estão diretamente relacionados sob o mesmo aspecto, ou seja, baixas tensões tendem a produzir baixos comprimentos de arco e vice-versa.

Wainer *et al* (1995) afirmam que a potência do arco, dada pelo produto entre sua tensão e corrente, é responsável pela largura do cordão de solda. Assim, para uma corrente constante ao se aumentar a tensão utilizada, aumenta-se também a largura do mesmo. O autor ainda salienta que conforme o valor utilizado para a tensão, determinados tipos de defeitos podem ser introduzidos. Desta forma, valores elevados podem gerar porosidades, excesso de respingos e mordedura. Valores baixos favorecem o aparecimento de sobreposições e instabilidade no arco.

### 4.5.3 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é definida por Ribeiro (2002) como a taxa de deslocamento do arco ao longo da junta, influenciando na energia de soldagem, ou seja, na quantidade de calor cedida à peça. Segundo o autor, mantendo-se todas as variáveis do processo constantes, tem-se a máxima penetração sob condições intermediárias. Velocidades elevadas resultam em menores penetrações, reforço e largura do cordão. Podem ainda ocorrer redução da concavidade da solda,

favorecendo o aparecimento de mordeduras e problemas metalúrgicos decorrentes da elevada energia de soldagem.

#### 4.5.4 Comprimento e Diâmetro do Eletrodo

Na engenharia de soldagem, alguns metais são selecionados na forma de eletrodos para produzirem a deposição de material ao cordão de solda com estes objetivos básicos: produzir cordões que possuem a mesmas ou parecidas propriedades mecânicas e físicas do metal base; produzir um cordão de solda, livre de descontinuidades. No primeiro objetivo, um cordão de solda, de composição idêntica ao metal base, possuirá características de metalúrgicas sem igual. Então, o primeiro objetivo da engenharia de soldagem é produzir uma composição de cordão de solda com propriedades iguais ou melhores que as do metal base. O segundo objetivo é alcançado, geralmente, ao se utilizar elétrodos que foram formulados para produzirem cordões relativamente livres de defeitos (Saunders, 1997).

De acordo com Ribeiro (2002), o comprimento do eletrodo conhecido como *stickout* é definido como a distância da ponta do tubo de contato e o final do eletrodo, ou seja, a soma das distâncias das pontas do tubo de contato e da tocha, acrescida da distância da ponta da tocha até a ponta do eletrodo. O comprimento do arco, no entanto, é caracterizado pela distância entre a ponta do eletrodo e a peça a ser soldada. E conforme Saunders (1997), a variação do *stickout* do eletrodo resulta em mudanças nas características elétricas do sistema. O autor ressalta que, como o aumento do *stickout* acarreta, por efeito Joule, o aumento na resistência elétrica, conseqüentemente eleva a temperatura e a taxa de deposição do eletrodo, quando mantidas constantes as outras variáveis. Todavia, Ribeiro (2002) e Wainer *et al* (1995) salientam que a elevação da resistência faz com que a tensão caia, sendo dessa forma compensada com um acréscimo de corrente, que proporciona um amento na taxa de decomposição do eletrodo, permitindo redução do comprimento do arame. Decorrente disso, segundo os autores, o cordão de solda tende a ficar estreito e com uma grande cratera.

Segundo Wainer *et al.* (1995), a taxa de fusão e a penetração são funções da densidade da corrente. Portanto, o autor afirma que se dois eletrodos com diâmetros diferentes puderem ser utilizados nas mesmas condições de soldagem, o de menor diâmetro dará maior taxa de decomposição e penetração. Eletrodos com maior diâmetro originam cordões mais largos e profundos que os de menor diâmetro (WAINER *et al* 1995 e RIBEIRO 2002).

Existe uma faixa apropriada para cada diâmetro de eletrodo, de maneira a permitir boas condições de operação. Cada diâmetro é escolhido em função da espessura do metal base, da posição de soldagem, do tamanho da poça de fusão e da quantidade de energia cedida a peça (WAINER *et al.* 1995 e RIBEIRO, 2002).

#### 4.5.5 Gás de Proteção

Segundo Saunders (1997), a maioria dos metais possui uma forte tendência em realizar combinações com oxigênio (formar óxidos) e, em menores proporções, com nitrogênio (formar nitretos) que, segundo Ribeiro (2002) são os principais compostos dos gases atmosféricos (20% de oxigênio e 80% de nitrogênio). Saunders (1997) também ressalta a tendência que o oxigênio possui para realizar ligações com o carbono para formar o gás monóxido de carbono. Conforme salienta Saunders (1997), todos estes produtos descritos são provenientes da reação química presente no processo MIG/MAG. A formação destes componentes no processo é uma fonte de deficiência na formação do cordão de solda, segundo o autor, e as consequências deste fato podem ser expressas por soldas deficientes com retenção de escória, porosidades e fragilizações do cordão. Portanto conforme Ribeiro (2002), precauções devem ser tomadas com o intuito de excluir estes gases nocivos das proximidades da poça de fusão, fato este realizado através da adição dos gases de proteção ao processo, que, segundo Saunders (1997), possuem a função primária de proteger a poça de fusão do contato com a atmosfera circunvizinha.

Murugan *and* Parmar (1993), Ribeiro (2002), Saunders (1997) e Wainer *et al* (1995), afirmam que o gás de proteção tem influência nos seguintes aspectos: no modo transferência do metal, na penetração, no perfil, nas propriedades mecânicas do cordão de solda, na velocidade máxima de soldagem, nas características do arco, na ação de limpeza ou desoxidação da poça de soldagem, nas tendências ao aparecimento de mordeduras e no custo da soldagem.

Essa proteção poder ser feita, segundo Wainer *et al* (1995) e Saunders (1997), através dos gases inertes (Argônio, Hélio ou suas misturas) ou de gases ativos (Dióxido de Carbono –CO<sub>2</sub>). Os Gases inertes, necessariamente usados na soldagem de metais não ferrosos, são também extremamente usados em aços cromados e aços de baixa liga. As principais diferenças básicas entre argônio e hélio são: densidade, condutividade térmica e as características do arco. As misturas de gases inertes visam obter características intermediárias entre propriedades dos gases. A adição de gases ativos aos gases inertes visa melhorar a estabilidade do arco, porém neste caso

o processo é MAG. Além de estabilizar o arco, a adição de pequenos teores de gases ativos tem as seguintes funções: mudar o contorno do cordão (na secção transversal), diminuição da ocorrência de respingos e de mordedura e aumentar a penetração.

Os gases que podem ser utilizados como ativos são os dióxidos de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na forma pura ou com adições de argônio e/ou oxigênio. É usado exclusivamente para a soldagem de aços-carbono e aços de baixa liga. A utilização dos gases ativos tem como vantagem o seu baixo custo, comparado ao argônio, hélio e a velocidade de soldagem e a penetração elevada. De outro lado, são desvantagens: o excesso de respingos e a atmosfera do arco oxidante, que pode causar porosidades, caso o eletrodo não tenha desoxidante, podendo influir nas propriedades mecânicas do depósito (SAUNDERS (1997) e WAINER *et al* (1995)).

No que se refere à vazão do gás protetor, conforme Ribeiro (2002), a mesma deve proporcionar boas condições de proteção. Vazões reduzidas podem acarretar o aparecimento de porosidades e outros problemas associados à falta de proteção. Vazões elevadas causam depressões na poça de fusão, tornando o cordão irregular, além de aumentar, desnecessariamente, o custo operacional.

#### **4.5.6 Velocidade de Alimentação**

A velocidade de alimentação, conforme Ribeiro (2002), governa o fluxo de corrente e, portanto, é uma variável importante no processo. Wainer *et al* (1995) mostram que existe uma relação direta entre a velocidade do arame e a corrente de soldagem e uma relação inversa destas com o comprimento do arco. Sua correta utilização se faz necessária de forma a se garantir cordões de solda com boas características geométricas e ausentes de defeitos. Altas velocidades de alimentação resultam em altas correntes de soldagem, o que pode acarretar o aparecimento de mordeduras e deformações no metal de base. Baixas velocidades acarretam a falta de penetração, falta de fusão entre passes e um formato irregular dos cordões.

### **4.6 Tipos de Transferência Metálica**

Dentre as características fundamentais de operacionalidade e eficiência do processo, destacam-se as formas como as transferências do material de adição (RIBEIRO, 2002). Saunders (1997) descreve os cinco modos básicos de transferência que pode acontecer com o processo e, segundo Ribeiro (2002), dependem da forma do ajuste das variáveis operacionais e do modo

como às forças atuantes no processo interagem. Saunders (1997) apresenta três modos tradicionais de transferência que são a de curto-circuito, globular e a spray. Com os mais recentes desenvolvimentos em tecnologia de fonte de energia, dois modos de transferência de níveis mais altos, spray pulsado e tensão de superfície, foram desenvolvidos. Embora estes dois modos de transferências utilizem fontes de energias mais caras, as vantagens permitem aos usuários, facilmente, justificar o custo adicional em muitas aplicações. A seguir, serão descritos os mais tradicionais modos de transferências metálicas no processo de soldagem MIG/MAG que podem ser observadas na *figura 4.3*.

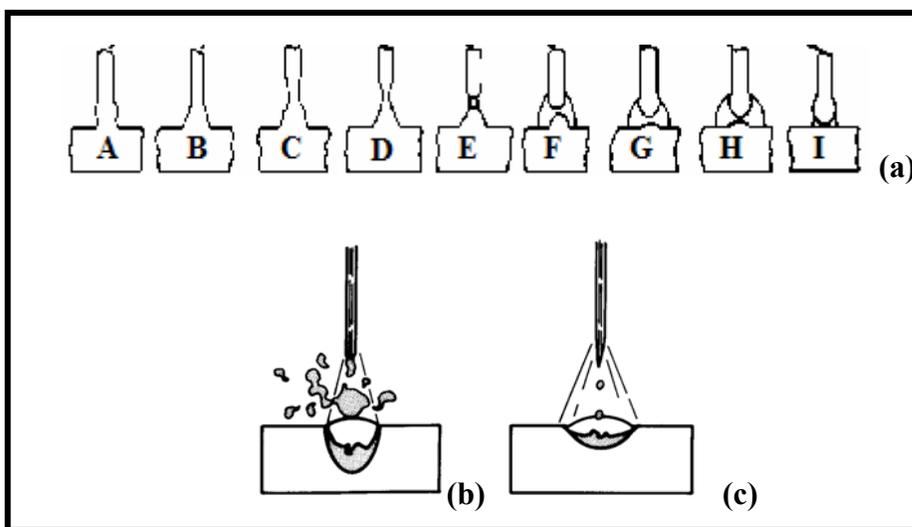


Figura 4. 3 - Tipos de transferências entre o eletrodo e o metal base: (a) Transferência Curto circuito, (b) Transferência Globular e (c) Transferência por Spray

Fonte: Saunders (1997).

**Transferência por Curto Circuito:** caracteriza-se pelo uso de baixas tensões; toda a transferência do metal acontece quando certa quantidade do eletrodo se acumula em sua extremidade, na forma de uma gota, a qual é transferida a poça de fusão no momento do contato no metal-base (*figura 4.3a*) (RIBEIRO, 2002 e SAUNDERS, 1997). De acordo com Saunders (1997), o calor introduzido por este tipo de transferência é baixo, o que torna pequena a penetração da solda; portanto, o autor salienta que se deve atentar a este fato para assegurar uma boa soldagem em seções maiores. Porém, o autor destaca que, devido a esta característica, a solda pode ser realizada em todas as posições. Transferência por Curto Circuito é particularmente adaptável à soldagem em seção de medida média. Esta técnica de soldagem, segundo Lytle

(1993), é utilizada para unir materiais finos em todas as posições, matérias espessos nas posições verticais e sobre cabeça e no preenchimento de grandes espaços.

**Transferência globular:** caracteriza-se por ser um tipo de transferência típico de ambientes que utilizam CO<sub>2</sub> ou hélio ou argônio com alto potencial de CO<sub>2</sub> (RIBEIRO, 2002 e SAUNDERS, 1997). De acordo com Ribeiro, (2002) toda a transferência do metal acontece quando uma certa quantidade do metal de adição se acumula na ponta do eletrodo, formando uma gota que é transferida para a peça ao se atingir um certo volume (*figura 4.3b*). As correntes e tensões utilizadas situam-se acima daquelas utilizadas na transferência por curto circuito. Contudo, Lyttle (1993) informa que, devido à natureza ocasional dessa transferência, o nível de respingos pode ser alto. Este fato, conforme Saunders (1997) é verificado pelo modo irregular de como as gotas são dirigidas pelo arco à poça de fusão. O nível de respingos pode ser minimizado ao se utilizar o CO<sub>2</sub> como gás de proteção e ao se ajustar o arco de forma a condicionar que a gota do eletrodo esteja debaixo da superfície do metal a ser fundido e dentro da cavidade gerada pela força do arco.

**Transferência por Spray:** caracteriza-se por ocorrer de maneira muito estável, com mínimas perturbações ao arco e com pouca produção de respingos (RIBEIRO, 2002 e SAUNDERS 1997). Segundo Saunders (1997), neste modo de transferência, o eletrodo é transferido a poça de fusão na forma de pequenas gotículas de tamanhos iguais, formando uma pequena chuva na forma de Spray (ver *figura 4.3c*). Segundo o autor, esta “chuva” é a responsável por produzir uma superfície relativamente lisa a solda. Graig (1987) , Ribeiro (2002) e Saunders (1997) afirmam que o grande inconveniente são as altas correntes utilizadas, as quais podem dificultar ou inviabilizar a união de chapas finas, além de alterar as propriedades em certas ligas que necessitam de um controle apurado sobre o fluxo de calor durante a soldagem, de maneira a assegurar suas qualidades metalúrgicas. Segundo os autores, outra limitação do modo de transferência por Spray é a sua restrição quanto à capacidade de posição, a qual é limitada em plana e horizontal. Sobre estes aspectos, Ribeiro (2002) salienta que o modo de soldagem pulsada permite alternativas interessantes a estas limitações. Apesar destas limitações, Saunders (1997) afirma que este processo fornece o mais estável e desejável modo de transferência.

As características das transferências são muito dependentes da composição do gás de proteção, da composição química do metal de adição e dos parâmetros elétricos. A natureza das

transferências metálicas tem importantes efeitos na habilidade de soldagens em várias posições, o grau de penetração, a estabilidade da poça de fusão e na quantidade de material de deposição perdida através de respingos (STENBACKA *and* PESSON, 1989).

## 4.7 MIG/MAG Pulsado

Conforme Ribeiro (2002), o advento da eletrônica trouxe mudanças significativas nas fontes de soldagem, fazendo surgir no cenário fabril, em meados da década de 60, o processo MIG pulsado, o qual revolucionou as técnicas convencionais anteriormente utilizadas. Com o modo pulsado, tornou-se possível a obtenção de uma transferência tipicamente por *Spray*, com a vantagem de se utilizar baixas correntes médias, fato esse que permitiu sua utilização na soldagem de chapas de menor espessura. O que caracteriza o modo de transferência metálica por *Spray* pulsada citada anteriormente (ver seção 4.6) O uso do modo pulsado, segundo Dutra (1996) e Saunders (1997) possibilitou a soldagem fora da posição plana e a união de materiais de menor espessura. Contudo, o autor atenta para a importância da correta seleção das grandezas envolvidas no processo para que os objetivos da utilização adequada da corrente pulsada sejam atingidos, pois tal tarefa tem sido uma das principais razões de sua falta de popularidade na indústria.

Davis (1996) afirma que o processo MIG/MAG convencional sofre restrições devido às limitações sobre o controle da transferência metálica, que torna o método muito instável e de difícil controle. O autor ainda ressalva que o modo por *Spray* de transferência metálica proporciona maior estabilidade dentre os demais, além de apresentar melhor qualidade dos cordões de solda. Entretanto, são verificadas sérias restrições do uso da transferência por *Spray* na soldagem de chapas finas (conforme visto na seção 4.6), decorrente do alto aporte de calor apresentado. Utilizando-se de pulsos intermitentes de alta corrente, é possível, então, obter uma transferência tipicamente por *spray* com pouca quantidade de energia liberada, o que reduz de maneira significativa a ocorrência de distorções e amplia a faixa de utilização do processo. (DUTRA (1996), GRAIG (1987), LYTTLE (1993) e STENBACKA *and* PESSON (1989)).

Segundo Ribeiro (2002), devido às vantagens deste modo de transferência, o mesmo tem sido alvo de diversos pesquisadores. O autor ainda salienta que o controle preciso dos parâmetros, a pequena produção de respingos, a pressão homogênea do arco sobre a poça de fusão e o pequeno grau de distorções, resultantes do relativo resfriamento da peça durante o

tempo de base também são características do modo de transferência por *spray*, o que, conforme salienta, o autor são propriedades requeridas quando são soldados materiais pouco espessos e componentes de precisão. Espessuras situadas entre 2 e 6,5 mm são facilmente soldadas no modo pulsado, apesar de estarem na faixa correspondente à transferência globular (Davies, 1996). Outra vantagem, segundo Davis (1996), de se pulsar a corrente é a possibilidade de utilização de eletrodo de diâmetros superiores a 1,6 mm, obtendo-se maiores taxas de decomposição em relação a eletrodos mais finos.

Contudo, o MIG/MAG pulsado introduziu alguns fatores adicionais ao modo convencional de transferência por *Spray*, denominados parâmetros de pulso, que devem ser analisados conjuntamente com os parâmetros convencionais. O acréscimo desses fatores aumentou ainda mais a complexidade do processo no que se refere à determinação de parâmetros operacionais adequados, de modo a promover boas características de soldagem (Ribeiro, 2002).

Através da **figura 4.4**, pode-se observar que a corrente pulsada é uma onda periódica onde uma corrente de base se alterna com um valor de nível maior, uma corrente de pico em respectivos tempos de duração denominados tempo de base e pico. Wainer *et al* (1995) ressalva que diversos parâmetros de pulso podem ser utilizados, mas os parâmetros a serem controlados neste processo são: Corrente base ( $I_b$ ) e pico ( $I_p$ ), tempos de base ( $t_b$ ) e pico ( $t_p$ ). Ou ainda, segundo Ribeiro (2002), utilizar parâmetros derivados destes como a corrente média ( $I_m$ ), a frequência do pulso ( $f$ ) e o ciclo ativo ou “*Duty cycle*” (CA).

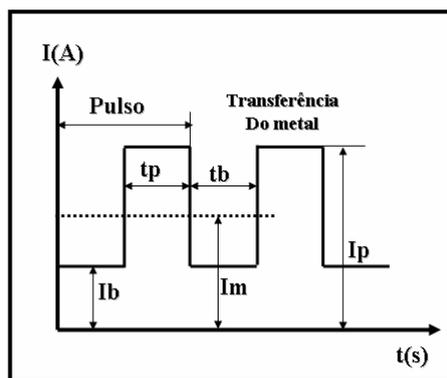


Figura 4. 4 – Esquema da onda Pulsada e seus componentes

Fonte: Davies (1996), Neto *and* Guimarães (1998) e Saunders (1997).

A corrente de pico ( $I_p$ ), segundo Ribeiro (2002), deve ser mantida acima da corrente de transição, de tal forma assegurar a transferência tipicamente por *spray*, garantindo uma quantidade de energia necessária durante cada pulso para promover o destacamento das gotas. E, segundo Trevisan *et al.* (1998), informam que a corrente de pico tem a função de garantir a boa fusão e a penetração do cordão.

Trevisan *et al.* (1998) afirma que a corrente de base ( $I_b$ ) mantém o arco estável e permite que a área da solda fique mais fria. O controle sobre a poça de fusão e a forma das gotas pode ser melhorado significativamente através da manutenção de correntes de base apropriadas, de maneira a reduzir a energia liberada para o metal base, sendo a corrente de base normalmente ajustada para valores mais baixos.

Wainer *et al.* (1995) afirma que a corrente média ( $I_m$ ), dada pela equação 4.1, tem a característica, na transferência pulsada, de apresentar baixos níveis de intensidade, podendo ser aplicada na soldagem de chapas finas.

$$I_m = \frac{(I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b)}{(t_p + t_b)} \quad (\text{Equação 4.1})$$

O tempo de pico é definido como o intervalo de tempo necessário para promover o destacamento da gota do eletrodo para o metal base. Tempos de picos estreitos tendem a produzir um arco mais constrito do que um pulso largo e baixo, oferecendo, portanto, algumas vantagens para a soldagem de juntas herméticas. O tempo de base é definido como o intervalo de tempo de utilização da corrente de base.

Ribeiro (2002) apresenta o ciclo ativo, definido na equação 4.2, onde se percebe a relação entre o tempo de deposição e o tempo de soldagem total. Esta grandeza, segundo o autor, é normalmente utilizado em substituição aos tempos de pico e de base em alguns experimentos na literatura, devido à menor variabilidade apresentada, o que permite uma maior facilidade quanto à regulação dos parâmetros.

$$CA = \left[ \frac{t_p}{(t_p + t_b)} \right] \times 100(\%) \quad (\text{Equação 4.2})$$

Entretanto, Davies (1996) mostra que apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado de transferência, especialmente para os aços inoxidáveis e alumínio, a complexa

natureza deste processo e o alto grau de habilidade exigida por parte dos soldadores na correta seleção dos parâmetros operacionais têm limitado, de maneira significativa, sua aceitação industrial.

## **4.8 Considerações Finais**

A necessidade em se obter um maior número de informações à respeito das características do modo pulsado de transferência metálica vem crescendo, bem como sua utilização nas aplicações industriais. Assim, uma maior compreensão do processo se faz necessário, de modo a explicar certas peculiaridades funcionais deste, promovendo, assim, sua melhor utilização. Desta forma, de acordo com Ribeiro (2002), diversos pesquisadores têm se empenhado nessa tarefa de desvendar todos os segredos que envolvem o assunto. Neste contexto, ferramentas estatísticas vêm sendo utilizadas na tentativa de elucidar certas particularidades de processos, de modo a propiciar sua melhor utilização em função da manipulação das variáveis envolvidas.

## 5. Modelagem Experimental

O presente capítulo tem a finalidade de apresentar e discutir uma abordagem sintética do DOE aplicado ao QFD em um processo de soldagem MIG/MAG pulsado. Nesta seção são abordadas as informações pertinentes à construção da matriz QFD além do planejamento e preparação do experimento, onde se define o modo de medição das respostas, a definição das grandezas consideradas fixas e os equipamentos envolvidos.

### 5.1 Considerações Iniciais

O processo de soldagem MIG/MAG tem se revelado como aquele de maior ascensão no ambiente industrial, decorrente de sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões de solda obtidos. O modo pulsado aumentou ainda mais a faixa de utilização do processo, possibilitando a soldagem de chapas finas em todas as posições (Ribeiro, 2002). Contudo, Dutra (1996) afirma que, apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado, a complexa natureza desde o grau de habilidade exigida por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais, têm limitado, de maneira significativa, sua aceitação pelas indústrias de soldagem.

Este trabalho será baseado nas necessidades de uma empresa do setor automotivo que utiliza o processo de soldagem MIG/MAG pulsado em sua linha de montagem. O trabalho foi realizado em paralelo a um trabalho de diploma desenvolvido por um aluno (estagiário da organização em questão) do curso de engenharia mecânica da UNIFEI, que apresentou e coletou todas as informações necessárias aos estudos realizados pela equipe de pesquisadores. O objetivo inicial ao se realizar este estudo era de efetuar uma investigação detalhada nos parâmetros de pulso em um processo MIG/MAG pulsado, determinando quais parâmetros são mais importantes ao processo de acordo com as necessidades de um cliente que utiliza padrões de qualidades mais elevados, otimizando a configuração dos mesmos para que se obtenha a maior satisfação no cumprimento, das necessidades dos clientes, de acordo com uma escala de priorização estabelecida por ele. A organização apresentou o seguinte problema aos pesquisadores

responsáveis que utilizarão o laboratório de soldas (LSO) da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, para a realização de um estudo para se alcançar o objetivo descrito acima.

Conforme já descrito anteriormente (ver capítulo 2), o QFD é um conceito global, que provê meios de traduzir as exigências dos clientes nas exigências técnicas apropriadas para cada fase de desenvolvimento de produto, processo e/ou melhoria. Portanto observa-se as potencialidades da utilização do QFD neste caso, pois pretende-se introduzir as exigências de um cliente ao processo MIG/MAG pulsado da organização.

## 5.2 Construção da Matriz QFD

A aplicação do QFD no processo MIG/MAG pulsado envolve diversas etapas, conforme descrito no quadro seguinte, apresentando algumas variações em relação ao que foi demonstrado pela revisão bibliográfica (capítulo 2). A proposta de integração a ser conduzida nesta dissertação se baseia na versão de Macab (modelo de quatro fases) do método QFD (Akao, 1996; Cheng *et al.*, 1995). Para esta aplicação será considerada uma união entre a primeira e segunda matriz integrada ao estudo de uma série de técnicas estatísticas (DOE envolvendo um, dois ou mais fatores).

Esta versão se mostra mais vantajosa para o nosso objetivo inicial de aplicar o QFD no processo MIG/MAG pulsado, pois de acordo com Cheng *et al.* (1995) em um estudo de QFD numa empresa fornecedora de peças, no qual recebe o desenho e as especificações do produto, processo ou melhoria do seu cliente, certamente o modelo tradicional não será adequado. Este exemplo apresentado por Cheng *et al.* (1995) aproxima-se muito do problema de pesquisa desta dissertação, que é baseado nas necessidades de uma empresa do setor de autopeças, que se utiliza o processo de soldagem MIG/MAG pulsado, e que necessita se adequar aos padrões de qualidade que é fornecido por um novo cliente. De acordo com o autor o modelo tradicional não pode ser generalizado para qualquer situação e em alguns casos o seu uso é apropriado.

A tabela 5.1 que pode ser verificada a seguir apresenta todo planejamento inicial realizado para a confecção do QFD. Ela descreve detalhadamente todas as etapas envolvidas na construção da matriz QFD que foi baseada nas proposições feitas por Silva (2002), Akao, 1996; Cheng *et al.*, 1995, Chan and Wu (2002b).

| Seções | Etapas do QFD   | Observações   |
|--------|---|---|
| 5.3    | Determinação do Objetivo do QFD.  | Nesta etapa, deseja-se melhorar um processo já existente, que atenda as necessidades dos novos clientes.  |
| 5.4    | Obtenção das Informações do Cliente.  | Nesta etapa, deseja-se estabelecer as verdadeiras necessidades dos clientes.  |
| 5.5    | Identificação do grau de importância dos requisitos do Cliente                  | Nesta etapa, deseja-se estabelecer a importância de cada necessidades dos clientes comparadas entre si.   |
| 5.6    | A extração da tabela de desdobramento das Características do processo.          | Nesta etapa, deseja-se estabelecer quais características do processo podem ser estudados para se obter os requisitos do cliente.                          |
| 5.7    | O Processo de Relação.  | Nesta etapa deseja-se estabelecer o grau de influências ou interferência que um item de uma tabela terá sobre o outro.                                    |
| 5.8    | O processo de conversão – priorização das Características do Processo.          | Nesta etapa, deseja-se estabelecer o peso relativo atribuído a cada item das Características do Processo.   |
| 5.9    | O estabelecimento dos valores estratégicos para as Características do processo. | Nesta etapa, deseja-se estabelecer a melhor configuração das Características do Processo, para que as necessidades dos clientes sejam melhor satisfeitas. |
| 5.10   | Análise da matriz QFD.  | Nesta etapa, deseja-se estabelecer as conclusões obtidas a partir do QFD.   |

Tabela 5. 1 - Desdobramento do Planejamento do QFD.

### 5.3 Determinação do Objetivo do QFD

Para o caso em questão foi escolhido um cliente da organização em especial para fazer a aplicação do método. Isto porque existem diferenças acentuadas nas necessidades dos vários grupos de clientes, que utilizam os produtos da empresa em questão. Por isso o QFD foi utilizado para o desenvolvimento de uma melhoria no processo MIG/MAG pulsado da organização, para atender as necessidades específicas deste cliente.

O QFD deverá ser útil no processo de melhoria, pois em integração com o DOE poderá determinar quais fatores de processo são críticos ao sistema, além de proporcionar a melhor configuração para os mesmos. Visando também traduzir e introduzir as necessidades dos clientes para o sistema.

## 5.4 Obtenção das Informações do Cliente

A obtenção da “voz do cliente” surgiu (conforme mencionado anteriormente na sessão 5.1) de uma proposta de uma empresa do setor de soldagem, que necessita adequar-se aos padrões de qualidade de um novo cliente, de onde se compilou estas necessidades, deixando-as em formato de pesquisa para sua divulgação.

Para se obter as informações dos clientes, de acordo com Silva (2002) e Cheng *et al.* (1995), foram definidos o Mercado alvo e a Técnica de coleta de dados para definição dos requisitos dos clientes.

### 5.4.1 Mercado Alvo

O mercado alvo foi definido a partir da possibilidade da realização de uma pesquisa, feita pela equipe de pesquisadores em parceria com a organização do setor de autopeças, que utiliza soldagens em seu processo de fabricação. Portanto, com o advento da entrada de novas organizações no mercado automotivo brasileiro forçou a empresa em questão a desenvolver diferentes padrões de qualidade para cada cliente. Isso levou a empresa possuir um mercado alvo fixo, onde a organização procura cada vez mais atender todos os clientes do mercado, desenvolvendo um padrão de qualidade para cada um. Como a organização procura melhor satisfazer um cliente que está começando a despontar no mercado automotivo brasileiro, a mesma necessita desenvolver novas tecnologias e métodos para estabelecer um padrão de qualidade diferente necessário a suprir a este cliente.

### 5.4.2 Técnica de Coleta de Dados e Escolha da Amostra

Para Cheng (1995), a seleção da técnica mais apropriada depende do tipo da informação desejada e do orçamento disponível. Para o estudo em questão, o interesse é descobrir quais são as necessidades e os desejos dos clientes. Segundo o mesmo autor, as técnicas qualitativas são as mais apropriadas, para alcançar este objetivo, pois permitem a geração de idéias e aprofundamento do ponto de vista do cliente. Tendo como objetivo principal estabelecer uma lista de necessidades, que seja a mais ampla possível. Chan and Wu (2002b), Cheng (1995), afirmam que as técnicas qualitativas devem ser utilizadas como forma de coleta de dados para a chamada “voz do cliente”, portando a entrevista foi determinada como a melhor forma de se coletar as informações dos clientes. Para Mattar (1996) a entrevista se caracteriza pela existência

de um entrevistador, que fará perguntas ao entrevistado. A entrevista poderá ser feita individualmente ou em grupo.

Dentre as vantagens do método das entrevistas, segundo Carnevalli (2001), o entrevistador pode tirar dúvidas, explicar as questões ao entrevistado, além de permitir identificar as discordâncias. Para Silva (2002), o método pode apresentar algumas desvantagens, pois tem a capacidade de apresentar problemas de comunicação entre o entrevistador e o entrevistado, e assim também consumir muito tempo e gerar altos custos, o que pode levar a utilização de pequenas amostras, tendo como consequência o prejuízo da confiabilidade da pesquisa. Cheng (1995) afirma que a decisão sobre o tamanho apropriado da amostra deve levar em consideração a precisão estatística e confiabilidade desejada na pesquisa.

A obtenção da “voz do cliente” neste trabalho foi baseada numa entrevista, realizada entre o grupo de pesquisadores e os responsáveis técnicos da organização, que apresentou todas as informações enviadas pelo cliente a organização. A qualidade na solda para o cliente em questão está relacionada com a geometria do cordão e com o nível de respingos apresentados pelo processo, e deve se aproximar de um padrão estabelecido pelo cliente. A partir destes padrões a organização então estabeleceu metas para que seu processo atinja os parâmetros de qualidade exigidos pelo seu cliente.

Portanto, como se trata de uma pesquisa exclusiva para uma determinada organização do setor automobilístico brasileiro, tornou-se fácil a estipulação de uma eventual população para a obtenção de informações para pesquisa. Esse fato facilitou o levantamento da chamada “voz do cliente” para a realização do método QFD, além de fornecer as informações necessárias para a realização do experimento.

Estas informações geradas nesta etapa podem ser melhor visualizadas na tabela 5.2, que apresenta o desdobramento dos requisitos do cliente (voz do cliente) estratificada em vários níveis de acordo Chan and Wu (2002a) e Cheng (1995) (ver seção 2.7.1.2). A tabela 5.2 também apresenta as metas que foram estabelecidas pelos pesquisadores em comum acordo com a organização.

| Desdobramento dos Requisitos do Cliente |                     |                            |                      |
|---|---------------------|----------------------------|----------------------|
| Nível 01                                | Nível 02            | Nível 03                   | Metas definidas      |
| Qualidade da Solda                      | Geometria do Cordão | Diluição (D)               | A maior possível.    |
|   |                     | Penetração (P)             | A maior possível.    |
|   |                     | Índice de Convexidade (IC) | Atingir meta de 30%. |
|   | Aparência da Solda  | Índice de Respingos (IR)   | A menor possível.    |

Tabela 5. 2 - Desdobramento dos Requisitos do Cliente

Como orientação para o projeto, procurou-se estabelecer padrões ou metas de qualidade aceitáveis para os parâmetros. Com relação à penetração e diluição do cordão adotou-se como fator de orientação a maximização da resposta de que sempre são positivas do ponto de vista da resistência final da solda. Com relação ao índice de convexidade considerou-se que os valores inferiores a 30% são considerados adequados (SILVA et al 2000). Um índice de convexidade superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração. Com relação ao índice de respingo é sempre desejável a sua minimização independente de quaisquer circunstâncias.

### 5.4.3 Descrição dos Requisitos do Cliente

A seguir, para um melhor entendimento dos requisitos do cliente, registrou-se com o auxílio de um projetor e de um planímetro as áreas de Reforço ( $S_r$ ) e de Penetração ( $S_p$ ), bem como a Penetração do cordão ( $p$ ), sua Largura ( $b$ ), e Reforço ( $r$ ) do Cordão, conforme esquema mostrado na **figura 5.1**, que apresenta a área de uma seção transversal de um cordão de solda.

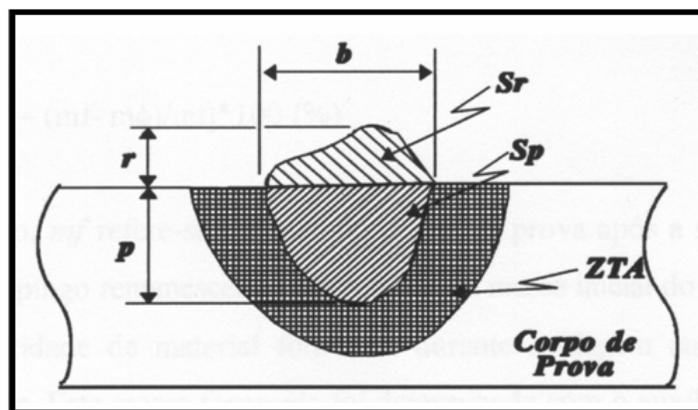


Figura 5. 1- Representação da área da seção transversal do cordão de solda

Fonte: Ribeiro (2000)

De posse dos resultados dos parâmetros descritos acima se determinou alguns índices derivativos dos quais foram utilizados para o desdobramento dos requisitos do Cliente e posteriormente serão utilizados na análise do processo.

Quanto ao quesito qualidade optou-se por avaliá-lo sob duas características: a forma geométrica do cordão e aparência da solda. Sendo a geometria do cordão representada pela diluição (D), pela penetração (P) e pelo índice de convexidade (IC) do cordão de solda. E a aparência da solda, que por sua vez será representada pelo Índice de Respingos (IR).

Ribeiro (2002), define a diluição do cordão de solda como um índice importante por estabelecer uma relação percentual da área penetrada pela área de reforço do cordão sendo a mesma definida pela Equação 5.1.

$$D = \left( \frac{S_p}{(S_p + S_r)} \right) \times 100(\%) \quad \text{(Equação 5. 1)}$$

Onde

$S_r$  = Área de Reforço

$S_p$  = Área de Penetração

O autor também define o índice de convexidade segundo a Equação 5.2

$$IC = \left( \frac{r}{b} \right) \times 100(\%) \quad \text{(Equação 5. 2)}$$

Onde

$r$  = Reforço do Cordão

$b$  = Largura do Cordão

Com relação ao indicador do Índice de Respingos IR, gerados durante o processo, Ribeiro (2002) define o Índice de Respingos (IR) pela relação entre a quantidade de material efetivamente depositada comparativamente e a quantidade de material fornecida, determinada pela Equação 5.3.

$$IR = \left( 1 - \frac{(m_F - m_\phi)}{m_t} \right) \times 100(\%) \quad \text{(Equação 5. 3)}$$

Nesta equação,  $m_F$  refere-se à massa do corpo de prova após a soldagem, eliminando qualquer traço de respingo remanescente,  $m_\phi$  refere-se a massa inicial do corpo de prova e  $m_t$  refere-se a quantidade de material fornecida durante a soldagem através do sistema de alimentação do arame que pode ser determinada com a utilização de um tacômetro, o qual permite avaliar o comprimento do arame consumido em um determinado tempo de soldagem. De

posse deste resultado é possível, através da densidade do material e do diâmetro do arame, determinar a massa total fornecida pelo eletrodo considerando-se para isso a Equação 5.4

$$m_i = \text{Densidade} \times \text{Volume} \quad (\text{Equação 5. 4})$$

Onde:

$\text{Densidade} = 7,692 \text{ kg/cm}^3$ , valor este obtido pela pesagem de 1 metro de arame consumível.

$$\text{Volume} = \left[ \frac{\pi}{4} \times (d)^2 \right] \times l \quad (\text{Equação 5. 5})$$

Com:

$d$  = Diâmetro do eletrodo

$l$  = Comprimento do arame.

Vale ressaltar que a diferença entre a massa depositada e a massa consumida é decorrente da quantidade de respingos apresentada para uma determinada combinação de fatores.

## 5.5 Identificação do Grau de Importância dos Requisitos do Cliente

Conforme já discutido na revisão bibliográfica (capítulo 2) muitos métodos e técnicas estão sendo utilizadas para melhor compor este grau de importância na matriz QFD. Silva (2002) utiliza-se da metodologia seis sigma, outros autores como Ida *et al.* (1999) ressaltam a utilização de métodos de lógica difusa (AHP) para a determinação dos quais dentre os requisitos do cliente possui maior importância para o mesmo. Para este estudo, optou-se por não utilizar nenhuma destas técnicas ou métodos, devido ao número reduzido de qualidades exigidas pelo cliente. O que poderia tornar o trabalho oneroso, além de apresentar resultados parecidos com os obtidos pelos meios convencionais. Portanto, optou-se por utilizar o método tradicional que consiste em definir uma escala de importância para os requisitos do cliente através da atribuição de notas de acordo com a opinião dos clientes. Devido a número reduzido de requisitos os pesquisadores optaram pela utilização de uma escala de 1 a 5 que foi estabelecida como base de definição para o grau de importância dos requisitos, de acordo com o que foi discutido pelos pesquisadores com a organização.

O grau de importância foi obtido diretamente do cliente através da entrevista já discutida no item 5.4. Este grau de importância estabelecido para os requisitos do cliente, mede quais ele considera mais e menos importante, servindo para o cálculo do peso atribuído a cada necessidade.

Estas informações geradas nesta etapa podem ser melhor visualizadas na tabela 5.3, que apresenta as qualidades exigidas pelo cliente processo, e o seu grau de importância que foram utilizadas na confecção do QFD.

| <b>Desdobramento dos Requisitos do Cliente</b> |                     |                            |                    |
|--|---------------------|----------------------------|--------------------|
| <b>Nível 01</b>                                | <b>Nível 02</b>     | <b>Nível 03</b>            | <b>Importância</b> |
| Qualidade da Solda                             | Geometria do Cordão | Penetração (P)             | 5                  |
|  |                     | Diluição (D)               | 4                  |
|  |                     | Índice de Convexidade (IC) | 3                  |
|  | Aparência da Solda  | Índice de Respingos (IR)   | 2                  |

Tabela 5. 3- Grau de importância dos Requisitos do Cliente

## **5.6 A Extração da Tabela de Desdobramento das Características do Processo**

Após a conclusão da tabela de desdobramento dos requisitos exigidos pelo cliente, o pesquisador participou de uma outra discussão, onde foram decididas quais características do processo seriam estudadas, sendo estabelecida assim a tabela de desdobramento das características da qualidade para o processo.

Para esta etapa utilizou-se o estudo de Ribeiro (2002), que obteve resultados relevantes sobre o comportamento dos parâmetros de pulso nas características dos cordões de solda. Para facilitar o estudo foi adotada uma de suas recomendações para trabalhos futuros. Ribeiro (2002), recomenda a utilização de outros gases de proteção, incluindo o Argônio com percentuais de CO<sub>2</sub> e/ou O<sub>2</sub> de forma a avaliar a penetração e a formação de respingos.

Conforme descrito no capítulo 4, vários são os fatores, que influenciam o processo de soldagem MIG pulsado. Para efeito de análise, as características de processos para a realização do QFD foram os parâmetros de pulso, ou seja, corrente de pico ( $I_p$ ), corrente de base ( $I_b$ ), tempo de pico ( $T_p$ ) e tempo de base ( $T_b$ ), sendo os tempos de pico e base definidos pelo termo Ciclo Ativo (CA), determinado pela Equação 4.2. Acrescenta-se também ao estudo, a velocidade de alimentação do arame, que de acordo com Ribeiro (2002) apresentou resultados consideráveis durante os seus estudos preliminares e por ser considerada na literatura como um dos parâmetros

mais influentes sobre a geometria do cordão. Outro fator importante para escolha destes parâmetros foi à possibilidade de mudanças em seus níveis, num baixo tempo de setup o que é extremamente importante a organização.

Estas informações geradas nesta etapa podem ser melhor visualizadas na tabela 5.4 que apresenta as características do processo, que foram utilizadas na confecção do QFD.

| <b>Características de Processo</b>           |                            |                  |
|--|----------------------------|------------------|
| <b>Nível 01</b>                              | <b>Nível 02</b>            | <b>Nível 03</b>  |
| Parâmetros de Pulso                          | Tempo de Pico ( $T_p$ )    | Ciclo Ativo (CA) |
|  | Tempo de Base ( $T_b$ )    |                  |
|  | Corrente de Pico ( $I_p$ ) |                  |
|  | Corrente de Base ( $I_b$ ) |                  |
| Velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ) |                            |                  |

Tabela 5. 4 Características de processo incorporadas ao QFD

## 5.7 O Processo de Relação

Após a conclusão destas duas tabelas, iniciou-se o processo de relação, o qual foi realizado através de um consenso entre os pesquisadores, atribuindo pesos de 9 para forte relação, 6 para média 3 para uma fraca relação e zero quando não houver (AKAO, 1996; CHENG *et al*, 1995; CHAN *and* WU, 2002b e SILVA 2002).

Para preencher a matriz deve-se realizar um cruzamento dos itens das duas tabelas a fim de estabelecer o grau de influência de um sobre o outro. A partir desta afirmação foi iniciado o processo de preenchimento das relações.

O pesquisador resolveu adotar o valor numérico na matriz ao invés de símbolos como apresentados na revisão bibliográfica (ver capítulo 2) em razão de estar utilizando uma planilha para a facilitação nos cálculos.

## 5.8 O Processo de Conversão – Priorização das Características de Processo

Após a conclusão do processo de relação, iniciou-se o método de conversão que segundo Cheng *et al.*, (1995), é uma das etapas mais importantes no trabalho de construção da matriz QFD, pois é através dela que a importância atribuída pelos clientes a cada qualidade exigida é transferida às características de processo.

O processo de conversão foi realizado utilizando a Equação 2.3 que é definida por Burk *et al.*, (2002). Na Equação 2.3 multiplica-se o valor de cada relação determinado na seção 5.7 pelo respectivo peso relativo da qualidade exigida determinado na seção 5.5. Em seguida foi determinado o peso absoluto de cada característica de processo, somando-se os valores obtidos para cada coluna e colocando-se na célula correspondente. Com a determinação do peso relativo de cada característica do processo pode-se então estabelecer o peso relativo de percentual de cada um.

## **5.9 O Estabelecimento dos Valores Estratégicos para as Características do Processo**

Após a conclusão do processo de priorização das características de processo, iniciou-se o de estabelecimento dos valores estratégicos que segundo Cheng *et al.*, (1995), significa traçar o plano de melhoria para as características de processo. Isso implica definir novos valores para essas características de processo ou manter os valores atuais.

Neste ponto da pesquisa introduziu-se a técnica DOE para a obtenção da melhor configuração para a qualidade projetada, pois conforme já discutido anteriormente, se pretende realizar um estudo sobre as potencialidades deste método aplicado ao QFD. Para isto, os valores estratégicos serão calculados através de vários métodos e técnicas, onde logo após serão comparados com a técnica estatística DOE. A obrigação do estabelecimento de um método adequado para o cálculo da qualidade projetada se torna necessário, devido ao número reduzido de informações encontrado na literatura a respeito. Por isto, este trabalho realizou três proposição de cálculo para a qualidade projetada, onde se pretende estabelecer qual irá garantir os melhores resultados através de um estudo comparativo.

Segundo Peixoto (1999b), tais valores de qualidade projetada devem ser capazes de atender satisfatoriamente as necessidades do cliente, melhorando a posição competitiva do produto no mercado. Isso significa, que esses valores devem refletir o planejamento estratégico para o produto que por sua vez, é apresentado pelo índice de melhoria dos requisitos do cliente. Portanto, a necessidade de se obter os valores estratégicos para o processo se torna imprescindível.

## **5.9.1 DOE no Cálculo dos Valores Estratégicos para as Características de Processo.**

### **5.9.1.1 Considerações iniciais**

Cheng *et al.*, (1995), afirma que algumas ferramentas estatísticas como o DOE são muitos úteis à determinação dos valores estratégicos estabelecidos para a qualidade planejada (valores estratégicos). O autor salienta que a sua utilização é aconselhável quando os custos da experimentação não são muitos elevados. Portanto, para esta etapa optou-se pela utilização da ferramenta estatística: DOE, pois para a concretização do trabalho, utilizou-se o laboratório de soldagem (LSO) da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, contanto com o apoio do laboratório de Metrologia Dimensional e Metalografia, utilizados nas medições, o que facilitou a realização do experimento.

De acordo com Galdámez (2002) o DOE possui o objetivo de atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que a variabilidade da resposta de interesse seja a mínima ou que o valor do resultado seja próximo do valor nominal. Do objetivo proposto por Galdámez (2002), observa-se que o DOE pode ser utilizado para encontrar uma solução ótima a configuração dos valores estratégicos para características do processo. O que também contribuiu para a escolha do DOE como ferramenta a ser utilizada nesta etapa.

Outro fator a ser consultado para a escolha do DOE para o cálculo da melhor configuração dos valores estratégicos é o baixo custo da realização do planejamento de experimento em comparação ao procedimento convencional utilizado pela empresa na determinação dos parâmetros ótimos de seu processo de soldagem. Usualmente, na organização, a determinação dos parâmetros é feita de forma empírica, demandando altos custos e tempo demasiado, já que é necessário um grande número de ensaios baseados nos históricos da empresa. Conforme citado por Montgomery (1997) com um pequeno número de testes, as técnicas de planejamento de experimentos podem ser utilizadas para melhorar as características de qualidade de um produto ou um processo de fabricação.

Galdámez (2002), recomenda que durante o processo de experimentação seja feito um plano estratégico para coordenar as atividades. Para a realização do experimento, optou-se em adotar a estrutura baseada na posposta realizada no capítulo 3 (ver seção 3.4).

### 5.9.1.2 Reconhecimento e Definição dos Objetivos do Experimento.

A preocupação preliminar na realização de um experimento baseia-se na formulação do problema a ser analisado (Ribeiro, 2002). Para o estudo, o problema foi formulado visando obter uma boa condição de soldagem em termos de qualidade definida por algumas características geométricas do cordão de solda, mediante a análise da influência dos parâmetros de pulso mais adequados a este propósito, em um tipo de soldagem por *spray* num processo de soldagem MIG pulsado, quando da utilização de uma mistura de gás com 75% Argônio e 25% CO<sub>2</sub>.

### 5.9.1.3 Escolha das Variáveis (Parâmetros do experimento) e dos Níveis Específicos (Seleção dos níveis)

Para a definição dos parâmetros do experimento a serem empregados no trabalho, os pesquisadores utilizaram-se das experiências prévias de Ribeiro (2002). O autor realizou a definição dos parâmetros do experimento, através de um estudo de trabalhos pertinentes à área e ainda através de execução de ensaios preliminares. Através de seus estudos preliminares, Ribeiro (2002) optou por executar os parâmetros de pulso e a velocidade de alimentação do arame, e todas as demais grandezas foram consideradas fixas a seus valores adotados mediante referência na literatura. Para a realização desta etapa utilizou-se também da análise realizada para a determinação das características de processo do QFD (ver seção 5.6).

A tabela 5.5 apresenta os valores assumidos pelos parâmetros mantidos constantes durante o experimento, sendo estes adotados por Ribeiro (2002). Lembrando, que para este experimento utilizou-se de um gás de proteção diferente (75% de Argônio com 25% de CO<sub>2</sub>).

| <b>Parâmetros Constantes</b> | <b>Valores</b>                            |
|------------------------------|---|
| Tipo de eletrodo:            | ER 70S-6 (C-0,1% e Mn-1,6)                |
| Diâmetro do eletrodo:        | 1,2 mm                                    |
| Tipo de gás de proteção:     | 75% de Argônio com 25% de CO <sub>2</sub> |
| Vazão do gás:                | 15 l/min                                  |
| Velocidade de soldagem:      | 40 cm/min                                 |
| Distância tocha-peça:        | 17,5 mm                                   |
| Recuo do bico de contato:    | 5 mm                                      |
| Espessura do metal base:     | 6 mm                                      |

Tabela 5. 5 - Parâmetros mantidos constantes durante o experimento.

Como material de base para este estudo, utilizou-se o aço ABNT 1045, cuja composição química é mostrada na Tabela 5.6. Os corpos de prova foram preparados nas dimensões de 120x40x6 mm.

| C (%) | Mn (%) | Si (%) | P (%) | Cr (%) | S (%) | Nb (%) |
|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 0,46  | 0,78   | 0,20   | 0,026 | 0,020  | 0,014 | 0,003  |

Tabela 5. 6 - Composição Química (%) do aço ABNT 1045.

Fonte: Ribeiro (2002)

Para a determinação dos níveis máximos e mínimos dos fatores, adotou-se, baseado na referência acima (Ribeiro, 2002), onde o autor atribuiu valores iniciais para os níveis superiores e inferiores para que, através de ensaios preliminares, fossem determinados os valores definitivos desses níveis.

Os níveis superiores e inferiores para os parâmetros de experimentação são apresentados na tabela 5.7.

| Fatores                     | Unidade | Nível Inferior (-) | Nível Superior (+) |
|-----------------------------|---------|--------------------|--------------------|
| Corrente de Pico ( $I_p$ )  | A       | 280                | 350                |
| Corrente de Base, ( $I_b$ ) | A       | 70                 | 100                |
| Ciclo Ativo, (CA)           | %       | 40                 | 50                 |
| Vel. de Alim., (va)         | m/min   | 5                  | 6                  |

Tabela 5. 7- Níveis Operacionais dos fatores.

Fonte: Ribeiro (2002)

#### 5.9.1.4 Variáveis de Resposta:

Para a determinação das respostas do experimento utilizou-se dos requisitos do Cliente (ver seção 5.4). A resposta estabelecida para o projeto foi a qualidade do cordão, expressa em termos da forma geométrica do cordão e da aparência da solda. Sendo a geometria do cordão representada pela diluição (D), pela penetração (P) e pelo índice de convexidade (IC) do cordão de solda. E a aparência da solda, que por sua vez será representada pelo Índice de Respingos (IR).

Considerou-se para efeito deste trabalho, o cordão de solda que possuir uma qualidade adequada, ou seja, é aquele que obtém uma máxima penetração, uma máxima diluição do cordão, uma mínima em relação de respingo e índice de convexidade em torno de 30%. Pois conforme salientam Silva *et al* (2000) um índice de convexidade superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração. O autor considera que valores inferiores 30% ao índice de convexidade são considerados adequados.

### 5.9.1.5 Seleção da matriz experimental:

No presente estudo, adotou-se para a coleta e análise dos dados um fatorial fracionário em dois níveis, de resolução IV, pois se pretende avaliar apenas as interações de segunda ordem, e com replicação, para restringir o número de experimentações. Um fatorial completo utilizaria 36 experimentos, enquanto que o fracionário, apenas 16, sendo possível ainda, replicação. De acordo com a equação 5.6, tem-se que o número de experimento pode ser obtido da seguinte forma como pode ser observado na demonstração abaixo:

$$N = R \times 2^{k-1} \quad (\text{Equação 5. 6})$$

Onde:

$N$  = Número de Experimentos

$k$  = Número de Fatores do experimento.

$R$  = Número de Replicações

Atribuindo-se a partir do problema os seguintes valores para:

$k = 4$  para o Número de Fatores do experimento.

$R = 2$  para o Número de Replicações

Tem-se que:

$$N = 2 \times 2^{(4-1)} = 16$$

Portanto serão necessários 16 experimentos para a obtenção de uma resposta. Este cálculo foi obtido através da utilização do software Minitab. A opção em se adotar o fatorial fracionado foi proveniente da redução do número de experimentos, o que facilitou a realização do ensaio, e trouxe ganhos com relação ao custo e ao tempo.

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão (OP), com os experimentos realizados com duplicata e numa seqüência aleatória, definida através de base randômica do software Minitab. A tabela 5.8 mostra o planejamento experimental idealizado pelos pesquisadores no software Minitab.

| Seqüência Aleatória | Ordem Padrão | Ensaio |     |     |         |
|---------------------|--------------|--------|-----|-----|---------|
|                     |              | Ip     | Ib  | CA  | Va      |
| (SA)                | (OP)         | (A)    | (A) | (%) | (m/min) |
| 2                   | 1            | 350    | 70  | 40  | 6       |
| 14                  | 2            | 350    | 70  | 50  | 5       |
| 4                   | 3            | 350    | 100 | 40  | 5       |
| 3                   | 4            | 280    | 100 | 40  | 6       |
| 1                   | 5            | 280    | 70  | 40  | 5       |
| 16                  | 6            | 350    | 100 | 50  | 6       |
| 11                  | 7            | 280    | 100 | 40  | 6       |
| 7                   | 8            | 280    | 100 | 50  | 5       |
| 6                   | 9            | 350    | 70  | 50  | 5       |
| 8                   | 10           | 350    | 100 | 50  | 6       |
| 5                   | 11           | 280    | 70  | 50  | 6       |
| 9                   | 12           | 280    | 70  | 40  | 5       |
| 12                  | 13           | 350    | 100 | 40  | 5       |
| 10                  | 14           | 350    | 70  | 40  | 6       |
| 15                  | 15           | 280    | 100 | 50  | 5       |
| 13                  | 16           | 280    | 70  | 50  | 6       |

Tabela 5. 8 Tabela do planejamento Experimental

#### 5.9.1.6 Realização do experimento:

O banco de ensaios utilizado para a realização do experimento constitui-se basicamente de uma fonte de soldagem transistorizada inversora digitalizada, com imposição da corrente no modo pulsado, a qual possibilitou a flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. Foi utilizado um tacômetro associado ao sistema de alimentação do arame para se avaliar o comprimento do arame consumido em cada cordão e, desta forma, avaliar as respostas desejadas.

A *figura 5.2* apresenta o esquema do banco de ensaio. O modo de operação da fonte com imposição da corrente permite a regulagem da velocidade de alimentação do arame durante a soldagem, sendo a tensão variável durante o processo.

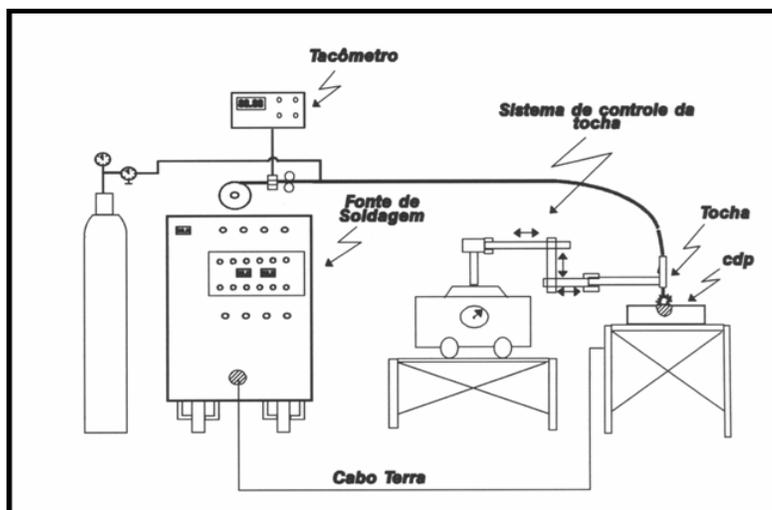


Figura 5. 2 – Esquema do banco de ensaio

Para a realização do ensaio, os corpos (cpd) de prova foram cortados, esmerilhados e identificados através da ordem experimental.

Realizados os ensaios os corpos de prova foram seccionados, polidos e atacados quimicamente com nital a 2%. A seguir, com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registrou-se as áreas de Reforço ( $S_r$ ) e de Penetração ( $S_p$ ), bem como a Penetração do cordão ( $p$ ), sua Largura ( $b$ ), e Reforço ( $r$ ) que podem ser observadas no esquema da **figura 5.1**. As medidas geradas nesta etapa pode ser visualizados na tabela dos resultados intermediários, no Apêndice A.

De posse dos resultados obtidos do experimento (Apêndice A) obteve-se a leitura das respostas, representadas pelo Índice de Respingos (IR), pelo índice de convexidade (IC) diluição (D), pela penetração (P), do cordão de solda, segundo a tabela 5.9, as quais permitiram analisar a geometria e a aparência dos cordões. Além disso, determinou-se para cada seqüência do experimento (OP), o valor da corrente média pode ser calculada conforme equação 4.1.

| (SA)                | (OP) | Ensaio |     |     |         |        | Resultados obtidos |       |       |      |  |
|---------------------|------|--------|-----|-----|---------|--------|--------------------|-------|-------|------|--|
|                     |      | Ip     | Ib  | CA  | Va      | Imédio | IR                 | IC    | D     | P    |  |
|                     |      | (A)    | (A) | (%) | (m/min) | (A)    | (%)                | (%)   | (%)   | (mm) |  |
| 2                   | 1    | 350    | 70  | 40  | 6       | 182    | 2,08               | 24,86 | 36,82 | 1,66 |  |
| 14                  | 2    | 350    | 70  | 50  | 5       | 210    | 7,74               | 22,75 | 26,12 | 2,03 |  |
| 4                   | 3    | 350    | 100 | 40  | 5       | 200    | 12,57              | 25,88 | 25,24 | 0,90 |  |
| 3                   | 4    | 280    | 100 | 40  | 6       | 172    | 1,23               | 43,07 | 34,21 | 2,24 |  |
| 1                   | 5    | 280    | 70  | 40  | 5       | 154    | 11,18              | 26,31 | 34,15 | 1,54 |  |
| 16                  | 6    | 350    | 100 | 50  | 6       | 225    | 13,79              | 21,96 | 27,96 | 0,85 |  |
| 11                  | 7    | 280    | 100 | 40  | 6       | 172    | 5,30               | 33,70 | 37,88 | 2,08 |  |
| 7                   | 8    | 280    | 100 | 50  | 5       | 190    | 13,38              | 21,36 | 47,20 | 1,15 |  |
| 6                   | 9    | 350    | 70  | 50  | 5       | 210    | 11,30              | 24,92 | 35,04 | 1,23 |  |
| 8                   | 10   | 350    | 100 | 50  | 6       | 225    | 24,54              | 23,47 | 31,26 | 1,05 |  |
| 5                   | 11   | 280    | 70  | 50  | 6       | 175    | 9,68               | 26,50 | 42,64 | 2,61 |  |
| 9                   | 12   | 280    | 70  | 40  | 5       | 154    | 6,71               | 27,42 | 40,45 | 1,85 |  |
| 12                  | 13   | 350    | 100 | 40  | 5       | 200    | 15,81              | 13,06 | 31,85 | 0,58 |  |
| 10                  | 14   | 350    | 70  | 40  | 6       | 182    | 3,65               | 25,90 | 37,30 | 2,03 |  |
| 15                  | 15   | 280    | 100 | 50  | 5       | 190    | 7,75               | 18,42 | 34,57 | 0,88 |  |
| 13                  | 16   | 280    | 70  | 50  | 6       | 225    | 8,76               | 28,10 | 35,10 | 2,03 |  |
| <b>Máximo Valor</b> |      |        |     |     |         | 225    | 24,54              | 43,07 | 47,20 | 2,61 |  |
| <b>Média</b>        |      |        |     |     |         | 192    | 9,71               | 25,48 | 34,87 | 1,54 |  |
| <b>Mínimo Valor</b> |      |        |     |     |         | 154    | 1,23               | 13,06 | 25,24 | 0,58 |  |

Tabela 5. 9 Sequenciamento e resultados dos experimentos

### 5.9.1.7 Análise dos dados e Interpretação dos resultados e documentação

Como foi descrito anteriormente, foram analisadas quatro respostas, sendo os experimentos definidos de acordo com um fatorial fracionário em dois níveis, de resolução IV e com replicação, resultando em 16 experimentos apresentados na ordem padrão OP, com os parâmetros corrente de pico (Ip) e base (Ib), ciclo ativo (CA) e velocidade de alimentação do arame variados (Va) aleatoriamente, conforme estabelecido na Tabela 5.9.

Apresentados os resultados, os mesmos foram processados e analisados em duas etapas distintas conforme apresentado no capítulo 3. Na primeira destas etapas, cada uma das respostas foi analisada separadamente através da utilização de um software comercial (Minitab), sendo estabelecida a significância dos efeitos e a influência desses efeitos sobre a superfície de resposta. Após a realização desta primeira análise parte-se para a segunda etapa, onde é realizada a

otimização dos fatores através da escolha ótima dos seus níveis. Nesta etapa foi estabelecida a melhor combinação dos fatores e seus níveis, no sentido de melhorar a qualidade e a aparência da solda. Esta segunda etapa é com certeza a principal etapa do trabalho, já que seu propósito é otimizar as entradas do processo em seus valores meta, sendo a resposta a melhor possível. E é justamente isto o que se busca, ao se introduzir a técnica DOE dentro do QFD, estabelecendo assim a melhor configuração para os valores metas de uma matriz a partir das especificações do cliente.

## 1. Primeira Etapa

### A. Índice de Respingos (IR)

O índice de respingos (IR) reflete a quantidade de material fornecida ao metal base que não participa do cordão de solda, perdida em forma de respingo. Através desse índice dá para se ter idéia da eficiência da deposição, ou seja, o quanto de material do eletrodo foi depositado.

O gráfico da **figura 5.3** foi utilizado para auxiliar na comparação da magnitude relativa dos fatores e também na significância estatística dos mesmos e de suas interações em ordem decrescente. Neste gráfico, há uma linha vertical que é utilizada para se determinar quais fatores ou interações são realmente importantes, pois qualquer efeito que se estende além desta linha de referência é considerado significativo. Essa reta é chamada de PSE (*Pseudo Standard Error*), um método criado por Lenth (*Ye et al, 2001*) baseado na mediana dos efeitos menores que é a mediana de todos os efeitos. Este tipo de gráfico serve como instrumento para uma primeira análise dos dados, ajudando a identificar os principais fatores.

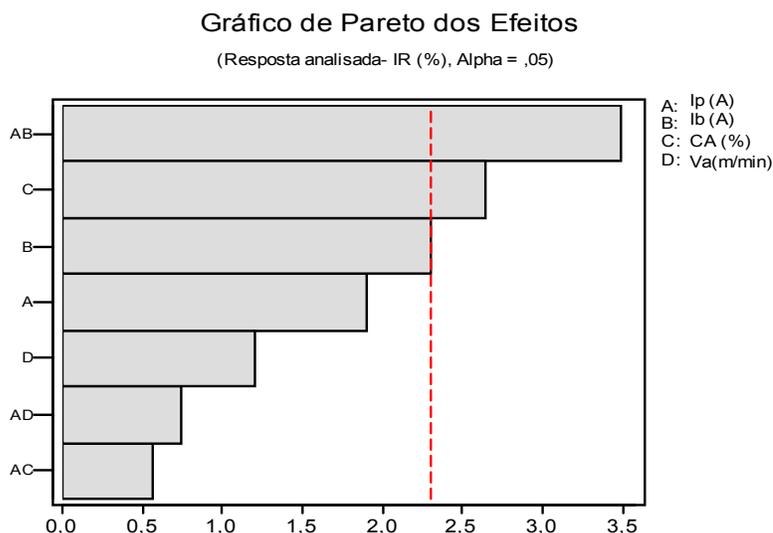


Figura 5. 3- Gráfico de Pareto dos Efeitos para o Índice de Respingos (IR)

O gráfico da distribuição normal de probabilidade dos fatores mostra a importância dos efeitos principais e suas interações em função de sua magnitude relativa e também da sua significância estatística. Os pontos sobre a reta da significância ou bem próximos da mesma não são de grande importância, já os fatores mais significativos estão localizados mais distantes da reta. Desta forma, teríamos os pontos AB (representando a interação entre os fatores corrente de pico e base), C (correspondendo ao fator ciclo ativo), como sendo os principais efeitos de acordo com o gráfico da **figura 5.4**.

De acordo com a análise realizada nos gráficos das **figuras 5.3 e 5.4**, observa-se que os fatores mais significativos para o Índice de Respingos é a interação entre os fatores corrente de pico e base ( $I_p \cdot I_b$ ), e o ciclo ativo (CA) nesta ordem.

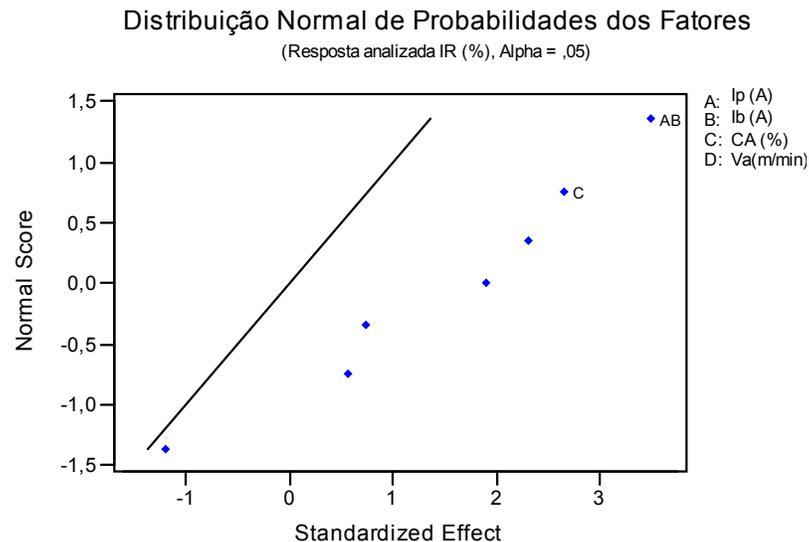


Figura 5. 4 – Distribuição Normal de probabilidade para o Índice de Respingos (IR)

O gráfico dos efeitos principais é importante na análise dos fatores do processo. Através dele é possível descobrir qual o melhor nível para cada fator em face de sua necessidade e também de determinar que fator realmente está sendo significativo na resposta. Esta significação maior ou menor é analisada comparando-se a linhas plotadas com a linha horizontal. Se as linhas de cada fator forem paralelas à esta, este fator não é de grande influência, sendo que esta aumenta a medida em que a inclinação das retas se eleva.

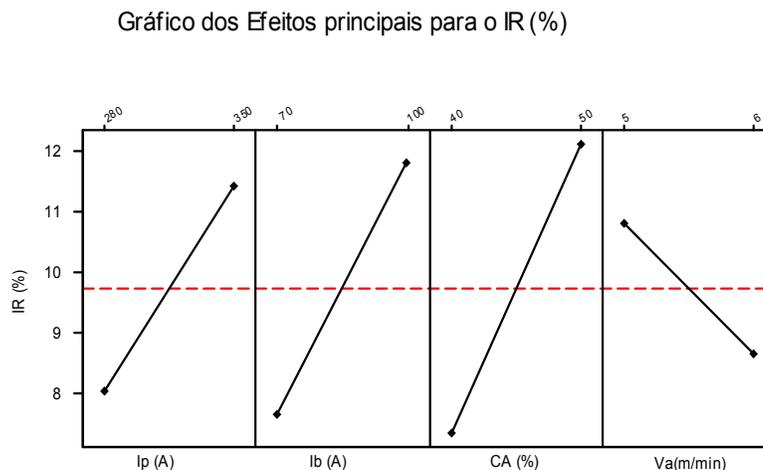


Figura 5. 5- Gráfico dos Efeitos principais para o Índice de Respingos (IR)

Do gráfico da **figura 5.5** observa-se que o menor ciclo ativo (CA =40%) representa um menor Índice de Respingos, seguido de uma corrente de base (Ib) de 70 (A), corrente de pico (Ip) de 280 (A) e a velocidade de alimentação do arame (VA) de 6 (m/min). Desta maneira tem-se, que a menor formação de respingos pode ser obtida trabalhando-se os fatores de pulso nos seus níveis inferiores e a velocidade de alimentação do arame (VA) no seu nível superior.

O gráfico da **figura 5.6** representa o de gráfico de interações entre fatores que também é de grande valia, pois através dele se torna possível conhecer se existem interações entre dois fatores, e se seus efeitos estão influenciando a resposta desejada, além de estar verificando quão forte é esta interação. Esta verificação da intensidade da interação pode ser avaliada através da posição da reta que interliga os níveis inferiores e superiores. Se essas estiverem paralelas não existe interação, ao passo que, quanto mais inclinadas estiverem as retas, maior será a interação.

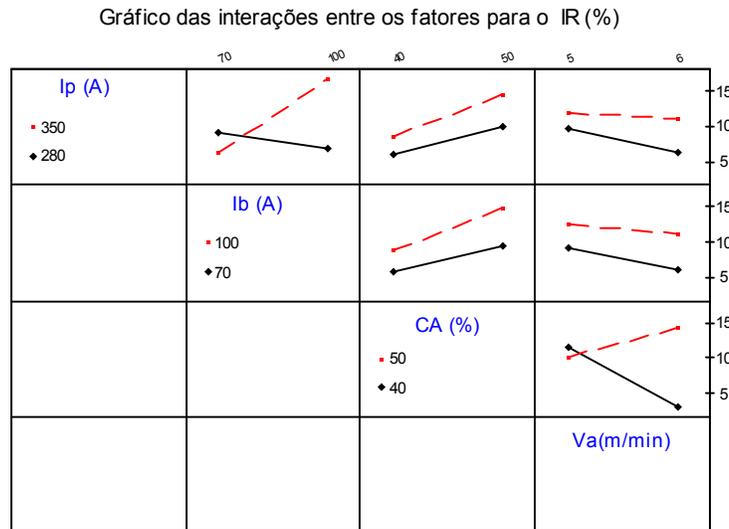


Figura 5. 6- Gráfico das Interações entre os Efeitos para o Índice de Respingos (IR)

Deste modo do gráfico da **figura 5.6** observa-se uma interação significativa entre as correntes de base (Ib) e de pico (Ip). Para a minimização do Índice de Respingos (IR), a melhor combinação resulta da utilização de uma corrente de pico (Ip) no seu nível superior (350 A) associado a uma corrente de base (Ib) no seu nível inferior (70 A). Como esta interação se mostrou mais significativa esta combinação prevalece sobre as demais. Desta forma, para a minimização na formação de respingos a seguinte combinação para os fatores se mostra a mais adequada: Ip (+), Ib (-), CA (-) e VA (+).

Usando um de nível significância de 95% ( $\alpha=0,05$ ), os resultados apresentados pelo software minitab (tabela 5.10) pode estabelecer um modelo de otimização para os valores metas do projeto, de acordo com uma mínima formação de respingos.

| Efeitos Estimados e Coeficientes para o IR |        |        |                        |        |       |
|--|--------|--------|------------------------|--------|-------|
| Termo                                      | Efeito | Coef.  | Desvio padrão do Coef. | T      | P     |
| Constante                                  |        | 9,717  | 0,9063                 | 10,720 | 0,000 |
| Ip (A)                                     | 3,436  | 1,718  | 0,9063                 | 1,900  | 0,095 |
| Ib (A)                                     | 4,159  | 2,079  | 0,9063                 | 2,290  | 0,051 |
| CA (%)                                     | 4,801  | 2,401  | 0,9063                 | 2,650  | 0,029 |
| Va(m/min)                                  | -2,176 | -1,088 | 0,9063                 | -1,200 | 0,264 |
| Ip (A)*Ib (A)                              | 6,326  | 3,163  | 0,9063                 | 3,490  | 0,008 |
| Ip (A)*CA (%)                              | 1,014  | 0,507  | 0,9063                 | 0,560  | 0,591 |
| Ip (A)*Va(m/min)                           | 1,336  | 0,668  | 0,9063                 | 0,740  | 0,482 |

| Continuação da tabela 5.10     |    |         |             |             |      |       |
|--------------------------------|----|---------|-------------|-------------|------|-------|
| Análise de Variância para o IR |    |         |             |             |      |       |
| Fonte                          | GL | SQ Seq. | SQ Ajustada | MQ Ajustada | F    | P     |
| Efeitos Principais             | 4  | 227,564 | 227,564     | 56,89       | 4,33 | 0,037 |
| Interações de Segunda ordem    | 3  | 171,339 | 171,339     | 57,11       | 4,35 | 0,043 |
| Erro Residual                  | 8  | 105,144 | 105,144     | 13,14       |      |       |
| Erro Puro                      | 8  | 105,144 | 105,144     | 13,14       |      |       |
| Total                          | 15 | 504,047 |             |             |      |       |

Tabela 5. 10 - Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab – Teste de Hipóteses, Anova (Análise de Variância), Fatoriais, Efeitos e Coeficientes.

Para a obtenção deste modelo, inicialmente, determina-se quais dos efeitos são estatisticamente significativos, através de um teste de hipótese conforme descrito no capítulo 3 . Para a realização do teste utiliza-se do p-values (P da tabela 5.10) dos efeitos principais e das interações, não importando, qual seja a sua ordem. Inicialmente, deve-se analisar as discrepância dos p-values pelo nível de significância adotado, para todos os efeitos principais e todas as interações. Comparando-se este p-values com o um  $\alpha$  desejado (um  $\alpha$  comumente usado é 0,05) tem-se duas respostas esperadas:

1. Se o p-value for menor ou igual ao  $\alpha$  desejado, conclui-se que o efeito é significativo.
2. Se o p-value for maior que o  $\alpha$  desejado, conclui-se que o efeito não é significativo.

Da tabela 5.10 e do  $\alpha$  desejado de 0,05 para o projeto, tem-se que os efeitos significantes são a interação entre os fatores corrente de pico e base ( $I_p * I_b$ ), e o ciclo ativo (CA), conforme já tinha sido observado no gráfico da **figura 5.3**.

Para cada termo no modelo, há um coeficiente (Coef da tabela 5.10). Considerando-se todos os fatores e todas as interações para estes coeficientes, pode-se construir uma equação, que representa a relação entre a resposta desejada e os fatores e as interações. Para os dados do projeto obteve-se a seguinte equação de regressão (equação 5.8) para o Índice de Respingo:

$$IR = 9,72 + 1,72(I_p) + 2,08(I_b) + 2,40(CA) - 1,09(VA) + 3,16(I_p * I_b) + 0,51(I_p * CA) + 0,67(I_p * VA) \quad (\text{Equação 5. 7})$$

Para minimizar o Índice de Respingo, adotou-se os seguintes níveis  $I_p$  (+),  $I_b$  (-), CA (-) e VA (+) que foram determinados anteriormente. Lembrando-se que para usar esta equação 5.8

deve ser utilizado o valor o valor quantificado do nível superior (+1) e inferior (-1) resultando num valor mínimo de IR da ordem de 2,87 (%).

Portanto da equação 5.8 tem-se que o índice de respingo mínimo será de 2,87 (%). De acordo com Ribeiro (2002) e Correia *et al* (1999) o Índice de Respingos (IR) expressa a quantidade de material cedido à peça que não participa da zona fundida. Ribeiro também afirma que de acordo com a literatura altas taxas de deposição de material do eletrodo são observadas neste processo, as quais se situam entre 92% a 98%. Esse fato foi comprovado neste trabalho onde se obteve um Índice Respingo (IR) mínimo de 2,87 (%).

Também é importante destacar que a utilização de uma corrente de pico em seu nível mínimo associado a uma corrente a uma máxima corrente de base também produz pouca formação de respingos. Isto parece interessante para a soldagem de chapas mais finas, em função de uma menor geração de calor pelo arco (baixa corrente média), já que o ciclo ativo deve ser o mínimo.

A porção inferior da saída do minitab da tabela 5.10 é um sumario da análise de variância, focando os tipos de termos no modelo. A linha intitulada “efeito principais”, abaixo de fonte, refere-se aos quatro efeitos principais, cada um tendo um único grau de liberdade, dando um total de 4 na coluna “GL” (grau de liberdade). A coluna “SQ Seq” (soma quadrática seqüencial) reporta o quanto a soma quadrática do modelo aumenta quando do modelo aumenta quando cada grupo de termos for adicionado a um modelo que contém os termos listados acima dos grupos. O primeiro número na coluna “SQ Seq” apresenta a soma quadrática do modelo para ajustar, tendo somente os quatro efeitos principais. A linha marcada “Interações de Segunda ordem” refere-se as interações, sendo a soma quadrática seqüencial reportada aqui como o aumento da soma quadrática do modelo, se os termos de interação forem adicionados a um modelo contendo os efeitos principais. A coluna intitulada “SQ Ajustada” (soma quadrática ajustada) reporta o quanto a soma quadrática do modelo aumenta quando cada grupo de termos for adicionado a um modelo contendo todos os outros termos. Agora pelo fato de qualquer planejamento fatorial, com igual número de réplicas em cada célula ser um planejamento ortogonal, resulta que a soma quadrática ajustada será igual à soma quadrática seqüencial. Consequentemente, os testes  $F$  para cada linha na análise de variância do Minitab estão testando a significância de cada grupo de termos (efeitos principais, interação de segunda ordem) como se eles fossem os últimos termos a serem incluídos no modelo. Claramente, somente os termos dos

efeitos principais são significativos. Esta análise realizada para a tabela 5.10 também pode ser estendida para as outras tabelas dos resultados dos cálculos realizados pelo Minitab.

## B. Índice de Convexidade (IC)

O Índice Convexidade expresso pela relação entre o reforço do cordão de solda é considerado como um parâmetro significativo, quanto se pretende avaliar a geometria dos cordões de solda. Conforme descrito anteriormente, a literatura recomenda como orientação, estabelecer padrões aceitáveis para o Índice de Convexidade próximo de 30% (Silva, 2000).

O gráfico da **figura 5.7** foi utilizado para auxiliar na comparação da magnitude relativa dos fatores e também na significância estatística dos mesmos e de suas interações em ordem decrescente conforme descrito anteriormente para o IR.

Conforme já mencionado anteriormente, adotando-se um nível de significância de 95% ( $\alpha=0,05$ ), pode-se observar do gráfico da **figura 5.7**, que os efeitos da Velocidade de alimentação do Arame (VA), Corrente de Pico (Ip), interação entre fatores Corrente de Pico e Ciclo Ativo (Ip\* CA), se mostram nesta ordem, como os mais significativos na formação do Índice de Convexidade (IC).

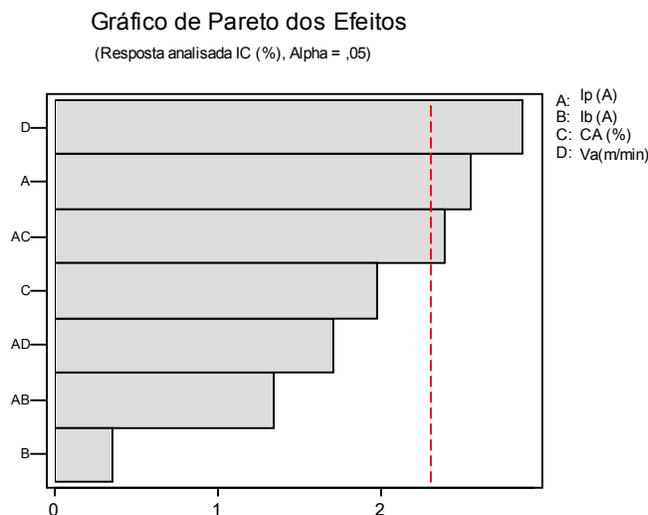


Figura 5. 7- Gráfico de Pareto dos Efeitos para o Índice de Convexidade (IC)

Do gráfico da **figura 5.8** tem-se que os pontos AC (representando a interação entre os fatores Corrente de Pico e Ciclo Ativo), D (correspondendo ao fator ciclo ativo) e A (correspondendo ao fator corrente de pico), como sendo os principais efeitos.

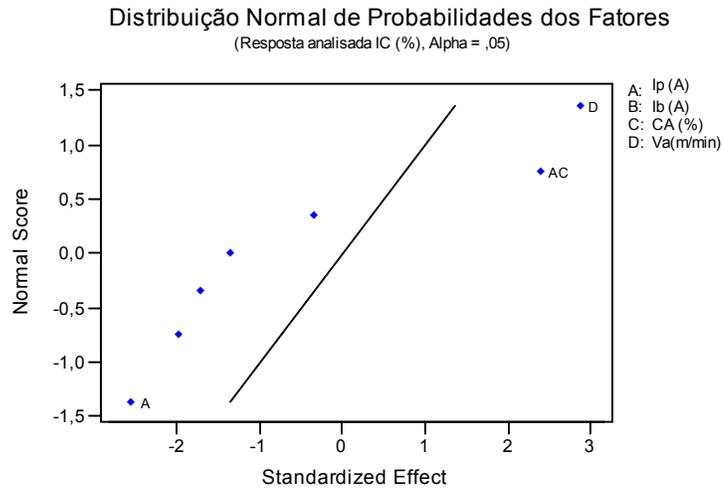


Figura 5. 8- Gráfico da Distribuição Normal de probabilidade para o Índice de Convexidade (IC)

De acordo com a análise realizada nos gráficos da **figura 5.7 e 5.8**, observa-se que os fatores mais significativos para o Índice de Convexidade (IC) são os fatores Velocidade de alimentação do Arame (VA), Corrente de Pico (Ip), e a interação entre fatores Corrente de Pico e Ciclo Ativo (Ip\* CA), nesta ordem.

Do gráfico da **figura 5.9** é possível descobrir qual o melhor nível para cada fator em face de sua necessidade, e também determinar se é realmente significativo na resposta.

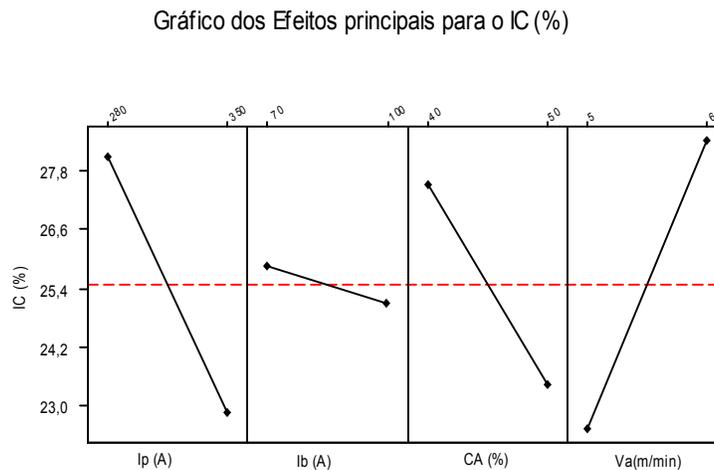


Figura 5. 9 - Gráfico dos Efeitos principais para o Índice de Convexidade (IC)

Portanto, desta figura percebe-se que: considerando os efeitos significativos dos fatores, a determinação do Índice Convexidade (IC) em torno de 30%, pode ser obtido trabalhando-se com o maior velocidade de alimentação do arame ( $VA = 6$  m/min), seguido de uma corrente de pico ( $I_p$ ) de 280 (A), de um o ciclo ativo (CA) de 40% e uma corrente de base ( $I_b$ ) de 70 (A). Desta maneira tem-se, que um Índice de Convexidade (IC) torno de 30%, pode ser obtido trabalhando-se os fatores de pulso nos seus níveis inferiores e a velocidade de alimentação do arame (VA) no seu nível superior.

Do gráfico da **figura 5.10** é possível conhecer se existem interações entre dois fatores em que seus efeitos estão influenciando a resposta desejada, além de estar verificando quão forte é esta interação. Deste modo observa-se uma interação significativa entre os fatores Corrente de Pico e Ciclo Ativo ( $I_p^* CA$ ). Para a obtenção de um Índice de Convexidade (IC) em torno de 30%, a melhor combinação resulta da utilização de uma corrente de pico ( $I_p$ ) no seu nível inferior (280 A) associado a um Ciclo Ativo (CA) no seu nível inferior (40%). Como esta interação se mostrou mais significativa, a combinação prevalece sobre as demais. Desta forma, obtenção de um Índice de Convexidade (IC) em torno de 30%, a seguinte combinação para os fatores se mostra a mais adequada:  $I_p (-)$ ,  $I_b (-)$ , CA (-) e VA (+).

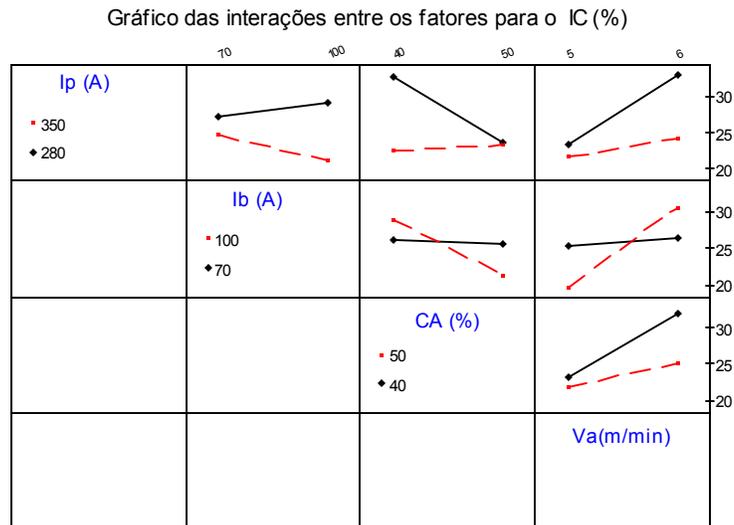


Figura 5. 10- Gráfico das Interações entre os Efeitos para o Índice de Convexidade (IC)

Usando um nível de significância de 95% ( $\alpha=0,05$ ), os resultados apresentados pelo software minitab (tabela 5.11) pode estabelecer um modelo de otimização para os valores metas do projeto, de acordo com um Índice de Convexidade (IC) em torno de 30 %.

| <b>Efeitos Estimados e Coeficientes para o IC</b> |               |                |                            |                    |          |          |
|---|---------------|----------------|----------------------------|--------------------|----------|----------|
| <b>Termo</b>                                      | <b>Efeito</b> | <b>Coef.</b>   | <b>Desvio pad do Coef.</b> | <b>T</b>           | <b>P</b> |          |
| Constante   |               | 25,400         | 1,032                      | 24,69              | 0,000    |          |
| Ip (A)  | -5,260        | -2,690         | 1,032                      | -2,55              | 0,034    |          |
| Ib (A)  | 0,730         | 0,365          | 1,032                      | 0,35               | 0,733    |          |
| CA (%)  | -4,090        | -2,045         | 1,032                      | -1,98              | 0,083    |          |
| Va(m/min)   | 5,930         | 2,965          | 1,032                      | 2,87               | 0,021    |          |
| Ip (A)*Ib (A)                                     | -2,785        | -1,393         | 1,032                      | -1,35              | 0,214    |          |
| Ip (A)*CA (%)                                     | 4,940         | 2,470          | 1,032                      | 2,39               | 0,044    |          |
| Ip (A)*Va(m/min)                                  | -3,535        | -1,767         | 1,032                      | -1,71              | 0,125    |          |
| <b>Análise de Variância para o IC</b>             |               |                |                            |                    |          |          |
| <b>Fonte</b>                                      | <b>GL</b>     | <b>SQ Seq.</b> | <b>SQ Ajustada</b>         | <b>MQ Ajustada</b> | <b>F</b> | <b>P</b> |
| Efeitos Principais                                | 4             | 320,374        | 320,374                    | 80,09              | 4,70     | 0,030    |
| Interações de segunda ordem                       | 3             | 178,624        | 178,624                    | 59,54              | 3,49     | 0,070    |
| Erro Residual                                     | 8             | 136,328        | 136,328                    | 17,04              |          |          |
| Erro Puro   | 8             | 136,328        | 136,328                    | 14,04              |          |          |
| Total   | 15            | 635,326        |                            |                    |          |          |

Tabela 5. 11- Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab – Teste de Hipóteses, Anova (Análise de Variância), Fatoriais, Efeitos e Coeficientes para o Índice de Convexidade (IC).

Para cada termo no modelo, há um coeficiente (Coef da tabela 5.11). Realizando-se um procedimento análogo ao apresentado para o índice de respingos (IR) e utilizando os dados do projeto obteve-se a seguinte equação de regressão (equação 5.9) para o Índice de Convexidade (IC):

$$\begin{aligned}
 IC = & 25,40 - 2,70(I_p) + 0,37(I_b) - 2,05(CA) + 2,97(VA) \\
 & - 1,39(I_p * I_b) + 2,47(I_p * CA) - 1,77(I_p * VA)
 \end{aligned}
 \tag{Equação 5. 8}$$

Para atingir um Índice de Convexidade (IC) em torno de 30 % , adotou-se os seguintes níveis Ip (+), Ib (+), CA (-) e VA (-) que foram determinados anteriormente. Lembrando-se que para usar esta equação 5.9 deve ser utilizado o valor o valor quantificado do nível superior (+1) e inferior (-1) resultando num valor IC da ordem de 29,65 (%).

Portanto da equação 5.10 tem-se que o Índice de Convexidade (IC) será de 29,65 (%). De acordo com Ribeiro (2002) o Índice de Convexidade (IC) expressa a relação o reforço do cordão pela largura de solda. Sendo importante destacar que a utilização de uma corrente de pico em seu

nível mínimo ou máximo associado a ciclo ativo em seu nível máximo também, determina um baixo índice de convexidade.

### C. Diluição (D)

A Diluição (D) é outro fator importante no controle da geometria de uma soldagem, expressando a porcentagem do metal de depósito, ou seja, a porcentagem do metal do eletrodo, que participa da zona fundida. Através da relação entre as áreas penetrada e a área de reforço é possível estabelecer uma correlação entre as variáveis do processo no sentido de melhor controlar as propriedades da solda resultante.

Considerando a mesma forma de análise do caso e adotando um nível de significância de 95% ( $\alpha=0,05$ ), tem-se, então para os resultados obtidos, conforme gráfico da **figura 5.11**, que apenas o efeito Corrente de Pico ( $I_p$ ), se mostra como a mais significativa Diluição (D) da solda.

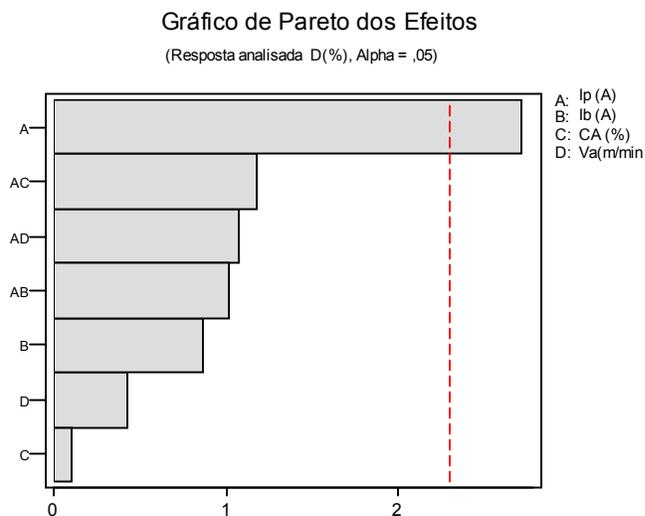


Figura 5. 11- Gráfico de Pareto dos Efeitos para o Diluição (D)

Do gráfico da **figura 5.12** tem-se que o ponto A (correspondendo ao fator corrente de pico), como sendo o principal efeito.

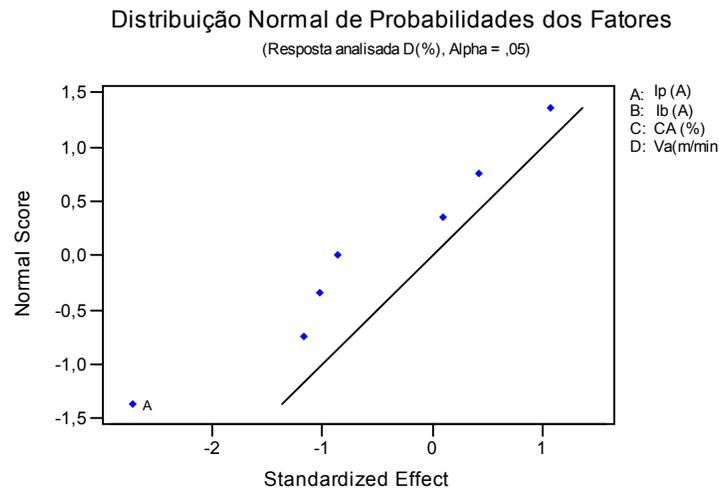


Figura 5. 12- Gráfico da Distribuição Normal de probabilidade para a Diluição (D)

De acordo com a análise realizada nos gráficos da **figura 5.13 e 5.12**, observa-se que o fator mais significativo para a Diluição (D) é o fator Corrente de Pico (Ip).

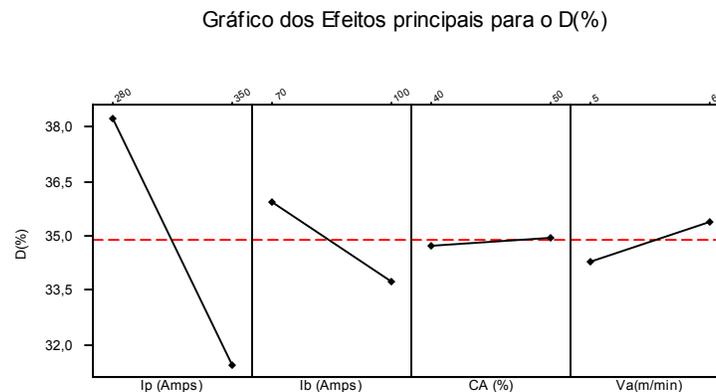


Figura 5. 13- Gráfico dos Efeitos principais para a Diluição (D)

Do gráfico da **figura 5.13** é possível descobrir qual o melhor nível para cada fator em face de sua necessidade, e também determinar se o fator é realmente significativo na resposta. Portanto desta figura percebe-se que, a determinação da máxima Diluição (D), que de acordo com Ribeiro (2002) garante melhor resistência na solda obtida, pode ser obtido trabalhando-se com a menor corrente de pico ( $I_p=280$  A) seguido de uma corrente de base (Ib) de 70 (A), de um

o ciclo ativo (CA) de 50% e uma velocidade, de alimentação do arame de 6 m/min. Desta maneira, tem-se que o maior Diluição (D) pode ser obtida trabalhando-se as correntes nos seus níveis inferiores e o ciclo ativo no seu nível superior e a velocidade de alimentação do arame (VA) no seu nível superior.

Da análise anterior não foi verificado nenhuma interação, que tivesse influência na resposta desejada, portanto optou-se por não utilizar o gráfico das Interações entre os efeitos para a Diluição (D). Deste modo, para a maximização da Diluição (D), a seguinte combinação para os fatores se mostra a mais adequada: Ip (-), Ib (-), CA (+) e VA (+).

Usando um nível de significância de 95% ( $\alpha=0,05$ ), os resultados apresentados pelo software minitab (tabela 5.12) pode estabelecer um modelo de otimização para os valores metas do projeto, de acordo com uma máxima Diluição (D). Isto significa obter-se uma boa área de penetração sem reforço excessivo.

| <b>Efeitos Estimados e Coeficientes para a Diluição</b> |               |                |                            |                    |          |          |
|---|---------------|----------------|----------------------------|--------------------|----------|----------|
| <b>Termo</b>  | <b>Efeito</b> | <b>Coef.</b>   | <b>Desvio pad do Coef.</b> | <b>T</b>           | <b>P</b> |          |
| Constante   |               | 34,862         | 1,256                      | 27,75              | 0,000    |          |
| Ip (A)  | -6,826        | -3,413         | 1,256                      | -2,72              | 0,026    |          |
| Ib (A)  | 0,249         | 0,124          | 1,256                      | 0,10               | 0,924    |          |
| CA (%)  | 0,249         | 0,124          | 1,256                      | 0,10               | 0,924    |          |
| Va(m/min)   | 1,069         | 0,534          | 1,256                      | 0,43               | 0,682    |          |
| Ip (A)*Ib (A)   | -2,561        | -1,281         | 1,256                      | -1,02              | 0,338    |          |
| Ip (A)*CA (%)   | -2,956        | -1,478         | 1,256                      | -1,18              | 0,273    |          |
| Ip (A)*Va(m/min)  | 2,704         | 1,352          | 1,256                      | 1,08               | 0,313    |          |
| <b>Análise de Variância para a Diluição</b>             |               |                |                            |                    |          |          |
| <b>Fonte</b>  | <b>GL</b>     | <b>SQ Seq.</b> | <b>SQ Ajustada</b>         | <b>MQ Ajustada</b> | <b>F</b> | <b>P</b> |
| Efeitos Principais                                      | 4             | 210,24         | 210,24                     | 52,56              | 2,08     | 0,175    |
| Interações de Segunda ordem                             | 3             | 90,44          | 90,44                      | 30,15              | 1,19     | 0,372    |
| Erro Residual   | 8             | 201,95         | 201,95                     | 25,24              |          |          |
| Erro Puro   | 8             | 201,95         | 201,95                     | 25,24              |          |          |
| Total   | 15            | 502,63         |                            |                    |          |          |

Tabela 5. 12- Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab – Teste de Hipóteses, Anova (Análise de Variância), Fatoriais, Efeitos e Coeficientes para a Diluição (D).

Para cada termo no modelo, há um coeficiente (Coef da tabela 5.12). Realizando-se um procedimento análogo ao apresentado para o índice de respingos (IR) e utilizando os dados do projeto obteve-se a seguinte equação de regressão (equação 5.10) para a Diluição (D):

$$D = 34,86 - 3,41(I_p) + 0,12(I_b) + 0,12(CA) + 0,53(VA) - 1,28(I_p * I_b) - 1,48(I_p * CA) + 1,35(I_p * VA) \quad (\text{Equação 5. 9})$$

Para atingir a máxima Diluição (D), adotou-se os seguintes níveis  $I_p$  (-),  $I_b$  (-), CA (+) e VA (+) que foram determinados anteriormente. Lembrando-se que para usar esta equação 5.10 deve ser utilizado o valor o valor quantificado do nível superior (+1) e inferior (-1) resultando num valor de diluição (D) da ordem de 38,87 (%).

Portanto, da equação 5.10 tem-se que a Diluição (D) será de 38,87 (%). De acordo com Ribeiro (2002) a Diluição avalia a relação entre as áreas de penetração e da seção transversal do cordão. Sendo importante destacar que no caso da Diluição percebe-se, através do experimento realizado a significativa influência do Corrente de Pico ( $I_p$ ) sobre esta resposta.

#### **D. Penetração (P)**

A Penetração (P) do cordão de solda é uma propriedade importante na análise da influência dos parâmetros de pulso na geometria do cordão de solda. No caso deste trabalho, optou-se pela análise da influência dos parâmetros de pulso em um processo por *spray*, portanto a penetração máxima passa a ser de fundamental importância no sentido de se trabalhar chapas mais espessas, quanto a penetração mínima importante no sentido de estender a utilização deste tipo de transferência para a aplicação em chapas finas. Para isto Ribeiro (2002) assegura que é fundamental estabelecer o efeito das variáveis do pulso sobre a penetração da solda, bem com o seu nível de significância estatística.

Considerando a mesma forma de análise dos casos anteriores e adotando um nível de significância de 95% ( $\alpha=0,05$ ), tem-se então para os resultados obtidos, conforme gráfico da **figura 5.14**, obtêm-se que os efeitos Velocidade de alimentação do Arame (VA), a corrente de pico ( $I_p$ ) e a Corrente de Base ( $I_b$ ), se mostram como os mais significativos para a Penetração (P) da solda.

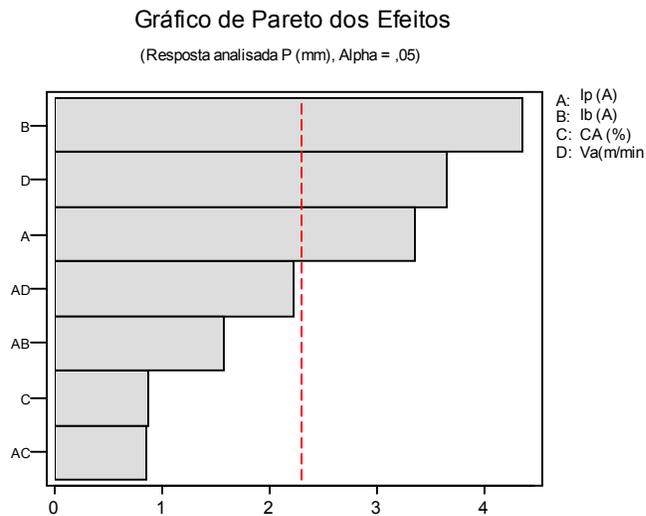


Figura 5. 14 - Gráfico de Pareto dos Efeitos para o Penetração (P)

Do gráfico da **figura 5.15** tem-se que os pontos D (correspondendo ao fator Velocidade de alimentação do Arame), A (correspondendo ao fator corrente de pico) e B (correspondendo ao fator corrente de base) como sendo os principais efeitos para a resposta em questão.

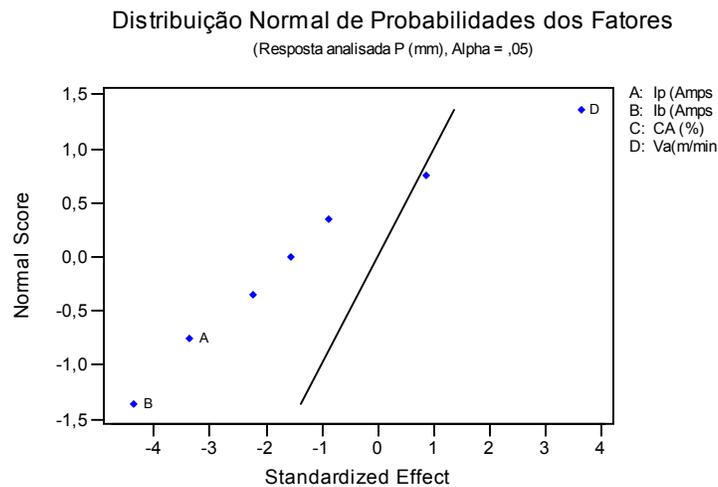


Figura 5. 15 - Gráfico da Distribuição Normal de probabilidade para o Penetração (P)

De acordo com a análise realizada nos gráficos das **figuras 5.14 e 5.15**, observa-se que os fatores mais significativos para a Penetração (P) são os fatores Velocidade de alimentação do Arame (Va), a corrente de pico (Ip) e a Corrente de Base (Ib).

No gráfico da **figura 5.16**, é possível descobrir qual o melhor nível para cada fator em face de sua necessidade e, também, determinar se o fator realmente é significativo na resposta.

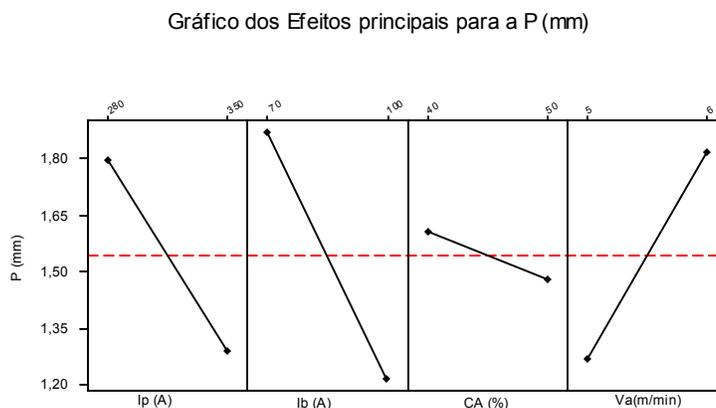


Figura 5. 16 - Gráfico dos Efeitos principais para o Penetração (P)

Portanto, desta figura, pode-se determinar a máxima condição de Penetração (P) trabalhando-se com a menor corrente de pico ( $I_p=280$  A), seguido de uma corrente de base ( $I_b$ ) de 70 (A), de um o ciclo ativo (CA) de 40% e uma Velocidade de alimentação do arame de 6 m/min. Desta maneira, tem-se que a maior Penetração (P) pode ser obtida trabalhando-se os parâmetros de pulso nos seus níveis inferiores e a velocidade de alimentação do arame (VA) no seu nível superior.

Da análise anterior, não foi verificada nenhuma interação que tivesse influência na resposta desejada. Portanto, optou-se por não utilizar o gráfico das Interações entre os efeitos para a Penetração (P). Deste modo, para a maximização da Penetração (P), a seguinte combinação para os fatores se mostra a mais adequada é:  $I_p$  (-),  $I_b$  (-), CA (-) e VA (+).

Usando o nível de significância de 95% ( $\alpha=0,05$ ), os resultados apresentados pelo software minitab (tabela 5.13) podem estabelecer um modelo de otimização para os valores metas do projeto, de acordo com uma máxima Penetração (P).

| Efeitos Estimados e Coeficientes para a P |         |         |                     |             |       |       |
|---|---------|---------|---------------------|-------------|-------|-------|
| Termo                                     | Efeito  | Coef.   | Desvio pad do Coef. | T           | P     |       |
| Constante                                 |         | 1,5444  | 0,07527             | 20,52       | 0,000 |       |
| Ip (A)                                    | -0,5062 | -0,2531 | 0,07527             | -3,36       | 0,010 |       |
| Ib (A)                                    | -0,6562 | -0,3281 | 0,07527             | -4,36       | 0,002 |       |
| CA (%)                                    | -0,1313 | -0,0656 | 0,07527             | -0,87       | 0,409 |       |
| Va(m/min)                                 | 0,5488  | 0,2744  | 0,07527             | 3,65        | 0,007 |       |
| Ip (A)*Ib (A)                             | -0,2362 | -0,1181 | 0,07527             | -1,57       | 0,155 |       |
| Ip (A)*CA (%)                             | 0,1288  | 0,0644  | 0,07527             | 0,86        | 0,417 |       |
| Ip (A)*Va(m/min)                          | -0,3362 | -0,1681 | 0,07527             | -2,23       | 0,056 |       |
| Análise de Variância para a P             |         |         |                     |             |       |       |
| Fonte                                     | GL      | SQ Seq. | SQ Ajustada         | MQ Ajustada | F     | P     |
| Efeitos Principais                        | 4       | 4,0212  | 4,0212              | 1,00531     | 11,09 | 0,002 |
| Interações de segunda ordem               | 3       | 0,7418  | 0,7418              | 0,24727     | 2,73  | 0,114 |
| Erro Residual                             | 8       | 0,7251  | 0,7251              | 0,09064     |       |       |
| Erro Puro                                 | 8       | 0,7251  | 0,7251              | 0,09064     |       |       |
| Total                                     | 15      | 5,4882  |                     |             |       |       |

Tabela 5. 13- Resultados dos Cálculos Realizados pelo Minitab – Teste de Hipóteses, Anova (Análise de Variância), Fatoriais, Efeitos e Coeficientes para a Penetração (P).

Para cada termo no modelo, há um coeficiente (Coef. da tabela 5.13). Realizando-se um procedimento análogo ao apresentado para o índice de respingos (IR) e utilizando os dados do projeto, obteve-se a seguinte equação de regressão (equação 5.11) para a Penetração (P):

$$P = 1,54 - 0,25(I_p) - 0,33(I_b) - 0,07(CA) + 0,27(VA) - 0,12(I_p * I_b) + 0,06(I_p * CA) - 0,17(I_p * VA) \quad (\text{Equação 5. 10})$$

Para atingir a máxima Penetração (P), adotaram-se os seguintes níveis Ip (-), Ib (-), CA (-) e VA (+) que foram determinados anteriormente, lembrando-se que, para usar esta equação 5.11, deve ser utilizado o valor quantificado do nível superior (+1) e inferior (-1), resultando num valor IC da ordem de 2,58 (mm).

Portanto, da equação 5.11, tem-se que a Penetração (P) será de 2,58 (mm). O experimento mostrou a relação direta entre as correntes e a penetração, além de apresentar as máximas condições de penetração, que são obtidas para a categoria de maior velocidade de alimentação do arame conforme observado por Ribeiro (2002).

### E. Sumário dos Resultados

Em função dos resultados anteriormente analisados, é possível elaborar uma tabela com a relação dos parâmetros ( $I_p$ ,  $I_b$ , CA e VA) e seus efeitos sobre as respostas estudadas (IR, IC, D e P) quando se utilizou o processo MIG/MAG pulsado com atmosfera protetora de 75% de Argônio com 25% de  $CO_2$ . Para permitir uma melhor abrangência do trabalho a tabela 5.14 apresenta um resumo com as condições obtidas para cada respostas desejadas no projeto.

| Respostas               | IR                | IC                   | D                 | P                |
|-------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| Parâmetros              |                   |                      |                   |                  |
| <b><math>I_p</math></b> | Nível (+1)        | Nível (-1)           | Nível (-1)        | Nível (-1)       |
| <b><math>I_b</math></b> | Nível (-1)        | Nível (-1)           | Nível (-1)        | Nível (-1)       |
| <b>CA</b>               | Nível (-1)        | Nível (-1)           | Nível (+1)        | Nível (-1)       |
| <b>VA</b>               | Nível (+1)        | Nível (+1)           | Nível (+1)        | Nível (+1)       |
| <b>Meta</b>             | A menor possível. | Atingir meta de 30%. | A maior possível. | A maior possível |

Tabela 5. 14 – Relação entre os parâmetros ( $I_p$ ,  $I_b$ , CA e VA) e as repostas desejadas (IR, IC, D e P)

Observando a tabela 5.14, pode-se tentar obter uma combinação ideal que permita atender a todos os requisitos exigidos para a geometria e para a aparência da solda, entretanto, isto torna-se difícil. Com relação aos outros fatores, há a necessidade de melhor ajustá-las para cada caso em particular e de acordo com o que se quer como resultado final.

Para se tentar obter um resultado que permita conjugar todos os fatores na obtenção de uma resposta adequada as metas iniciais, torna-se necessário realizar uma segunda etapa nos cálculos. Nesta etapa, pretende-se otimizar os fatores e seus níveis após a primeira análise feita na etapa anterior.

### 2. Segunda Etapa

Para se tentar obter um resultado que permita conjugar todos os fatores na obtenção de uma qualidade adequada, utilizou-se a ferramenta “Resposta Otimizada- *Response Optimizer*” também do software comercial Minitab. A ferramenta ajudará a identificar a combinação de ajustes das variáveis de entrada que, juntamente, otimizam a única resposta ou a um grupo de resposta. A otimização deve satisfazer a todas as exigências para todas as respostas no grupo. Existe, neste processo, uma medida chamada *desirability* ou desejabilidade (D) que mostra como

está a satisfação da combinação dos objetivos para todas as respostas, conforme já apresentado no capítulo 3 (ver seção 3.11). A desejabilidade tem uma amplitude que varia de 0 a 1, podendo ser ajustada diretamente no gráfico plotado de acordo com o que se deseja, simulando as diversas situações para as respostas ou grupo de respostas, como já citado anteriormente.

A etapa de otimização foi realizada da seguinte forma após a seleção das variáveis a serem otimizadas - Índice de Respingos (IR), Índice de Convexidade (IC), Diluição (D) e Penetração (P) (Coluna Resposta – “*Response*” da figura 5.17). Definiu-se com relação à Penetração (P) e Diluição (D) do cordão, adotou-se como objetivo a maximização da resposta, e com relação ao Índice de Convexidade (IC), considerou-se um valor objetivo uma resposta da ordem de 30% e, com relação ao índice de respingo (IR), adotou-se, como objetivo, a sua minimização, conforme apresentado anteriormente (Coluna Meta – “*Goal*” da figura 5.3). Lembrando-se que, para a situação de maximização (*maximize*), é necessário fornecer a menor leitura das respostas (Coluna menor – “*Lower*” da figura 5.17) obtidas no experimento (ver tabela 5.9), além de um alvo que para o trabalho foi adotado como a média aritmética (Coluna media – “*Target*” da figura 5.17) das respostas que se deseja maximizar (Linhas D e P da figura 5.17). Para a situação de minimização, é necessário fornecer a maior leitura (Coluna maior – “*Upper*” da figura 5.17) das respostas obtidas no experimento (ver tabela 5.9), além de um alvo que para o trabalho foi adotado como a média aritmética das respostas que se deseja minimizar. Para a situação de atingir um valor objeto, é necessário fornecer a maior e a menor leitura das respostas obtidas no experimento, além de um alvo que para o trabalho foi adotado como 30%, adotado da literatura. Vale ressaltar que a origem destes valores foi a tabela 5.9, detalhada no apêndice A.

Para a coluna *importance* (importância), foram atribuídos os valores estipulados através do grau de importância do QFD (ver seção 5.5), medidas, dentre os requisitos do cliente, as quais ele considera mais e menos importante, e servindo para o cálculo da resposta otimizada de acordo com os objetivos atribuídos ao projeto.

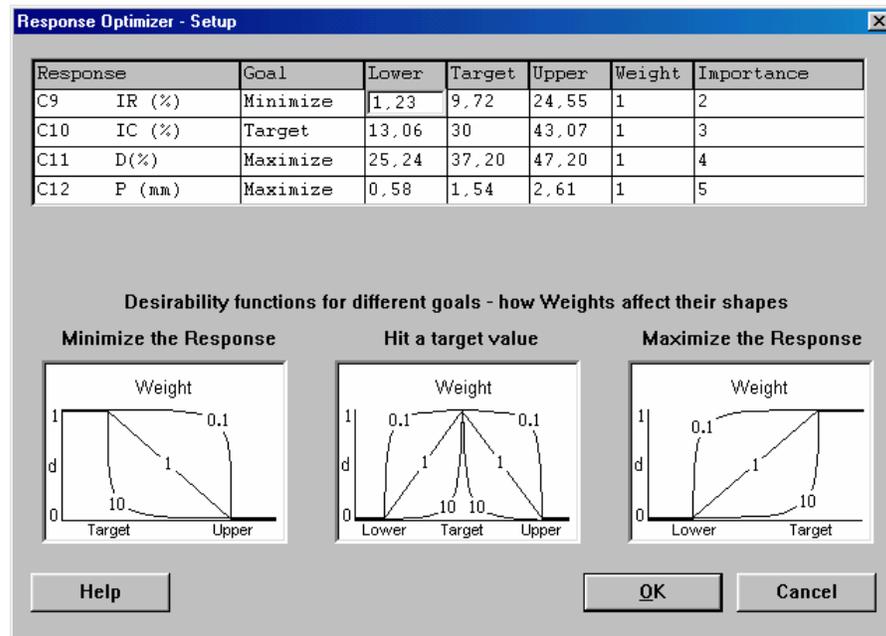


Figura 5. 17 – Definição dos valores para a otimização.

Depois de definidos os parâmetros, gerou-se o gráfico 5.16 para as respostas otimizadas que pode ser visto logo a seguir.

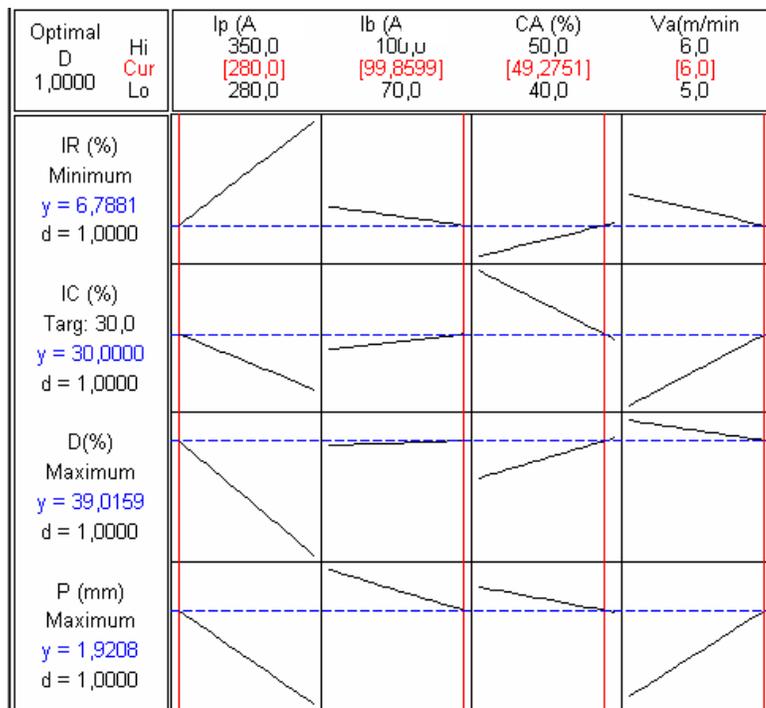


Figura 5. 18 - Gráfico da Resposta Otimizada para os Fatores.

Da análise do gráfico da resposta otimizada que foi gerado em função dos parâmetros acima determinados, chegando-se aos níveis ótimos de cada fator que permitem a otimização do resultado desejado. O gráfico da **figura 5.18** apresenta um IR otimizado de 6,79 % com uma desejabilidade de 1,0, um IC otimizado de 30,0 % também com desejabilidade de 1,0, uma D otimizada de 39,02 % com uma desejabilidade de 1 e uma P otimizada de 1,92 mm também com desejabilidade de 1,0, valores estes calculados em função da melhor combinação dos fatores influentes e seus respectivos níveis. Portanto a melhor configuração para os fatores é a que se segue na tabela 5.11. Dos resultados apresentados observa-se que a simulação gerou um coeficiente de desejabilidade global de 1 que mostra que a combinação dos objetivos para todas as respostas produz uma solução global satisfatória.

| <b>Solução Global</b>                         |           | <b>Resposta Prevista</b> |           | <b>Deserabilidade</b> |   |
|---|-----------|--------------------------|-----------|-----------------------|---|
| Ip =  | 280 (A)   | IR =                     | 6,79 (%)  | Ip =                  | 1 |
| Ib =  | 100 (A)   | IC =                     | 30,00 (%) | Ib =                  | 1 |
| CA =  | 50 (%)    | D =                      | 39,02 (%) | CA =                  | 1 |
| VA =  | 6 (m/min) | P =                      | 1,92 (mm) | VA =                  | 1 |
| <b>Coefficiente de Deserabilidade Global:</b> |           |                          |           | 1                     |   |

Tabela 5. 15 – Quadro Resumo das Respostas Obtidas

Portanto, a melhor configuração para os Valores Objetos (ou Estratégicos), calculados através do DOE, é aparentada na resposta otimizada obtida pela ferramenta do software comercial Minitab “Resposta Otimizada - Response *Optimizer*”. A tabela 5.15 apresenta esta solução global determinada pela técnica Projeto de experimentos para os valores estratégicos da matriz QFD, que serão comparados com outro método demonstrado nas próximas seções.

## 5.9.2 Outros Métodos de cálculo para os Valores Estratégicos das Características de Processo.

### 5.9.2.1 Opinião Técnica de um Especialista

Para a determinação dos valores estratégicos nesta etapa utilizou-se das recomendações realizadas por Silva (1996) na seção 2.7.6.3. O autor recomenda, a realização de uma avaliação técnica, baseada na opinião dos membros da equipe e na opinião técnica dos especialistas em projetos de produtos da companhia. Para esta fase da dissertação utilizou-se da experiência do professor doutor Sebastião Carlos Costa, titular da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e coordenador do laboratório de soldagem (LSO), que possui um vasto conhecimento de muitos anos, desenvolvendo pesquisas e trabalhos na área de soldagem. Utilizando-se da opinião do

professor Sebastião e das equações de regressão 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 obteve-se uma previsão para a resposta dos requisitos dos clientes (IR, IC, D e P). A tabela 5.16 apresenta uma solução global baseada na opinião do professor Sebastião juntamente com uma resposta prevista baseada nas equações de regressão.

| Opinião do Especialista |           |                   |           |
|-------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| Solução Global          |           | Resposta Prevista |           |
| Ip=                     | 350 (A)   | IR =              | 8,68 (%)  |
| Ib=                     | 70 (A)    | IC =              | 34,35 (%) |
| CA=                     | 50 (%)    | D=                | 26,23 (%) |
| VA=                     | 6 (m/min) | P =               | 1,84 (mm) |

Tabela 5. 16 – Quadro Resumo das Respostas Obtidas para a Opinião do Especialista

### 5.9.2.2 Utilização de referências especializadas sobre o assunto

Para a determinação dos valores estratégicos nesta etapa, utilizou-se de alguns artigos que avaliam a performance de alguns parâmetros da soldagem MIG Pulsada sobre as características geométricas e econômicas do cordão de solda. Optou-se por utilizar estes tipos de informação, pois os artigos são fontes adequadas de referências devido ao caráter científico, já que seus editores cercam-se de muitos cuidados para publicar um artigo em seus periódicos, no intuito de colaborar com a comunidade científica (VOKURKA, 1996). Corrêia *et al* (1999) foi o primeiro artigo a ser analisado em que o autor estuda a influência da corrente média ( $I_p$  e  $I_b$ ) e da frequência de pulso no processo MIG convencional e pulsado sobre as características econômicas do revestimento, representadas pela taxa de decomposição. Segundo o autor, adotando-se correntes médias elevadas da ordem de 230 A, os rendimentos serão superiores a 96%. Para que se atinjam elevados valores de corrente média, é necessário que se tenham elevadas correntes de pico e base, conforme pode ser observada na tabela 5.9. Portanto, baseada nesta afirmação do autor, adotaram-se, então, os níveis superiores como solução para as correntes de pico e base. Lambert (1989) estudou a influência das velocidades de alimentação do arame sobre a penetração, largura e o reforço do cordão de solda em tubos. Após seu estudo, o autor concluiu que a penetração e a largura aumentam com o aumento da velocidade de alimentação; portanto, baseada nesta afirmação do autor, adotou-se o nível superior como solução para a velocidade de alimentação.

Utilizando-se das referências especializadas sobre o assunto e das equações de regressão 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, obteve-se uma previsão para a resposta dos requisitos dos clientes (IR, IC, D

e P). A tabela 5.17 apresenta uma solução global baseada nas referências juntamente com uma resposta prevista baseada nas equações de regressão.

| <b>Opinião Baseada em Referencias Especializadas</b> |         |                          |          |                     |
|--|---------|--------------------------|----------|---------------------|
| <b>Solução Global</b>                                |         | <b>Resposta Prevista</b> |          | <b>Referências</b>  |
| Ip=  | 350 A   | IR =                     | 19,17(%) | Correa et al (1999) |
| Ib=  | 100 A   | IC =                     | 22,72(%) | Correa et al (1999) |
| CA=  | 50 %    | D=                       | 29,60(%) | Correa et al (1999) |
| VA=  | 6 m/min | P =                      | 0,95(mm) | Lambert (1989)      |

Tabela 5. 17 – Quadro Resumo das Respostas Obtidas para a utilização de referências

Da análise realizada nestas duas últimas seções, partiu-se, então, para a etapa de comparação entre os métodos de cálculos para os valores estratégicos apresentados a seguir.

### **5.9.3 Comparação dos métodos de Cálculo dos Valores Estratégicos para as Características de Processo.**

Para melhor visualizar os resultados obtidos nas duas etapas anteriores, optou-se pela confecção da tabela 5.18, que apresenta a descrição detalhada dos requisitos dos clientes (linha Parâmetros, Metas e Pesos), conforme obtidos nas seções anteriores (seção 5.4). A tabela 5.18 também exhibe as soluções globais para os requisitos de processo (linha parâmetros e nível), juntamente com as respostas prevista (linha resposta e valor esperados) para os requisitos dos clientes, calculados por meio do DOE, pela opinião do especialista e pela utilização de referencias especializadas. Além disso, pode-se observar também na tabela 5.18 um estudo da resposta prevista quando se altera a solução global obtida pelo três métodos de cálculo utilizados para a determinação dos valores estratégicos.

| Descrição dos Requisitos dos clientes | Parâmetros        |            | IR (%)        | IC (%)        | D(%)          | P (mm)            |
|---------------------------------------|-------------------|------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
|                                       | Metas             |            | Minimizar     | 30%           | Maximizar     | Maximizar         |
|                                       | Pesos             |            | 2             | 3             | 4             | 5                 |
| DOE                                   | Solução Global    | Parâmetros | <b>Ip (A)</b> | <b>Ib (A)</b> | <b>CA (%)</b> | <b>VA (m/min)</b> |
|                                       |                   | Nível      | 280           | 100           | 50            | 6                 |
|                                       | Resposta Prevista | Resposta   | <b>IR (%)</b> | <b>IC (%)</b> | <b>D (%)</b>  | <b>P (mm)</b>     |
|                                       |                   | Valor Esp. | 6,79          | 30,00         | 39,02         | 1,92              |
| Opinião Do Especialista               | Solução Global    | Parâmetros | <b>Ip (A)</b> | <b>Ib (A)</b> | <b>CA (%)</b> | <b>VA (m/min)</b> |
|                                       |                   | Nível      | 350           | 70            | 50            | 6                 |
|                                       | Resposta Prevista | Resposta   | <b>IR (%)</b> | <b>IC (%)</b> | <b>D (%)</b>  | <b>P (mm)</b>     |
|                                       |                   | Valor Esp. | 8,68          | 34,35         | 26,23         | 1,84              |
| Referências Bibliográficas            | Solução Global    | Parâmetros | <b>Ip (A)</b> | <b>Ib (A)</b> | <b>CA (%)</b> | <b>VA(m/min)</b>  |
|                                       |                   | Nível      | 350           | 100           | 50            | 6                 |
|                                       | Resposta Prevista | Resposta   | <b>IR (%)</b> | <b>IC (%)</b> | <b>D (%)</b>  | <b>P (mm)</b>     |
|                                       |                   | Valor Esp. | 19,17         | 22,71         | 29,61         | 0,95              |

Tabela 5. 18 – Quadro Resumo das Respostas

Para o parâmetro índice de respingo (IR), tem-se como meta atingir o menor valor possível, o que é verificado através do método DOE que atribui uma importância da ordem de 6,79 %. Ao se utilizar os outros métodos de cálculo para os valores estratégicos, observou-se acréscimo de 1,89% e 12,38% no valor de IR ao se utilizar a opinião do especialista e as referências bibliográficas respectivamente. Para o parâmetro índice de convexidade (IC), tem-se como alvo atingir um valor em torno 30%, o que foi verificado através uso do método DOE que atribui uma importância da ordem de 30 % ao IC. Ao se empregar os outros métodos de cálculo para os valores estratégicos, observou-se acréscimo de 4,35% ao utilizar a opinião do especialista e uma redução de 7,29% no valor de IC ao usar o método referências bibliográficas. Para o parâmetro Diluição (D), tem-se como meta atingir o maior valor possível, o que também foi verificado através do método DOE que atribui uma importância da ordem de 39,02% a diluição (D). Ao empregarem-se os outros métodos de cálculo para os valores estratégicos, observou-se uma redução de 12,79% ao utilizar a opinião do especialista e uma redução de se e 9,41% no valor da diluição (D) ao usar o método referências bibliográficas. Para o parâmetro Penetração (P), tem-se como meta atingir o maior valor possível, o que também foi verificado através do

método DOE que atribui uma importância da ordem de 1,92 mm. Ao se empregar os outros métodos de cálculo para os valores estratégicos, observou-se uma redução de 0,08 mm ao utilizar a opinião do especialista e uma redução de 0,97 mm no valor de P ao usar o método referências bibliográficas.

Portanto, comparando-se os três métodos de cálculos (linha DOE, Opinião do Especialista e Referências bibliográfica) dos valores estratégicos definidos neste trabalho, tendo como base a descrição dos requisitos dos clientes, observa-se que a solução obtida via DOE é aquela que promove a melhor resposta de acordo com as metas estabelecidas pelos clientes.

Ao final deste estudo, estabeleceu-se, então, a melhor configuração para os requisitos de processo, que pode ser observada na tabela 5.19.

| Valores Estratégicos ou Objetos |               |
|---------------------------------|---------------|
| Corrente de Pico                | $I_p=280$ (A) |
| Corrente de Base                | $I_b=100$ (A) |
| Ciclo Ativo                     | CA=50 (%)     |
| Velocidade de Alimentação       | Va=6 (m/min)  |

Tabela 5. 19 – Valores estratégicos para a Matriz QFD

## 5.10 Análise da Matriz QFD

Após a realização do estudo de cada etapa envolvida na construção da matriz, estabelecidas na seção 5.2, determinou-se, então, para o processo MIG Pulsado, a matriz QFD Requisitos de Cliente versus Requisitos de Processo. A **figura 5.19** apresenta a matriz QFD determinada a partir do planejamento inicial realizado neste trabalho. A figura mostra, detalhadamente, todas as informações coletadas referentes aos requisitos dos clientes, apresentando, também em uma forma estruturada, os requisitos de processo. Outra observação importante relativo à **figura 5.19** é a possibilidade de visualização da correlação entre os requisitos de processo e de cliente. Na figura, também se pode visualizar a configuração ótima dos valores objetos ou estratégicos para os requisitos de projeto de acordo com as condições iniciais estabelecidas pelos clientes.

| Requisitos de Projeto                 |                              |                     |                    | Requisitos de Cliente      |             |    |             |    |           |    |             |    |           |    |                           |     |               |   |                  |  |       |                |
|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|-------------|----|-------------|----|-----------|----|-------------|----|-----------|----|---------------------------|-----|---------------|---|------------------|--|-------|----------------|
| O QUE                                 | Qualidade do Cordão de solda | Geometria do Cordão | Aparência da Solda | Metas estabelecidas        | Importância |    | Corrente de |    | Pico (Ip) |    | Corrente de |    | Base (Ib) |    | Tempo de Ciclo Ativo (CA) |     | Velocidade de |   | Alimentação (VA) |  | TOTAL | TOTAL Relativo |
|                                       |                              |                     |                    |                            | In          | Cn | Cn*In       | Cn | Cn*In     | Cn | Cn*In       | Cn | Cn*In     | Cn | Cn*In                     | Cn  | Cn*In         | Σ | %                |  |       |                |
|                                       |                              |                     |                    |                            |             |    |             |    |           |    |             |    |           |    |                           |     |               |   |                  |  |       |                |
|                                       |                              |                     |                    | Penetração (p)             | ↑           | 5  | 9           | 45 | 3         | 15 | 6           | 30 | 9         | 45 | 135                       | 34% |               |   |                  |  |       |                |
|                                       |                              |                     |                    | Diluição (d)               | ↑           | 4  | 9           | 36 | 3         | 12 | 6           | 30 | 6         | 30 | 108                       | 27% |               |   |                  |  |       |                |
|                                       |                              |                     |                    | Índice de Convexidade (IC) | 30%         | 3  | 6           | 18 | 3         | 9  | 3           | 15 | 9         | 45 | 87                        | 22% |               |   |                  |  |       |                |
|                                       |                              |                     |                    | Índice de Respingos (IR)   | ↓           | 2  | 6           | 12 | 0         | 0  | 6           | 30 | 6         | 30 | 72                        | 18% |               |   |                  |  |       |                |
| <b>Importância Técnica Absoluta</b>   |                              |                     |                    |                            |             |    | 111         |    | 36        |    | 105         |    | 150       |    | 402                       |     | 100%          |   |                  |  |       |                |
| <b>Importância Técnica Relativa</b>   |                              |                     |                    |                            |             |    | 28%         |    | 9%        |    | 26%         |    | 37%       |    | 100%                      |     |               |   |                  |  |       |                |
| <b>Valores Objeto ou Estrategicos</b> |                              |                     |                    |                            |             |    | 280 (A)     |    | 100 (A)   |    | 50%         |    | 6 (m/min) |    | 100%                      |     |               |   |                  |  |       |                |

Figura 5. 19- Matriz QFD para o processo MIG pulsado

Ao se realizar uma análise criteriosa da matriz QFD obtida para o processo MIG pulsado, nota-se que o requisito primário (ou estratégico) do cliente em possuir um cordão de solda com qualidade foi desdobrado em mais dois requisitos secundários (ou táticos) que, por sua vez, foram estratificados em mais quatro requisitos terciários (ou operacionais), sendo organizados na forma de um diagrama de árvore. O que se observa é que a matriz QFD parte de um requisito primário estratégico abstrato e de difícil mensuração para um modelo baseado em quatro requisitos concretos e mensuráveis, que provêm detalhes para que soluções de engenharia sejam implementadas.

Outra observação importante referente aos requisitos dos clientes a ser ressaltada, é o processo de priorização estabelecido pelo QFD na forma de uma escala numérica. E de acordo com o processo de priorização, a Penetração foi determinada com 34% como o requisito terciário de maior importância após o estudo de correlação com os requisitos de processo. Portanto, de acordo com o QFD, a penetração (P) deve ser priorizada em relação aos outros requisitos, ou seja, o principal requisito a ser satisfeito pela empresa em relação ao seu cliente é o de maximização da penetração do seu cordão de solda. Em seguida, o QFD classificou diluição (D) com 27%, o índice de convexidade (IC) com 22% e o índice de respingo (IR) com 18%, estabelecendo-se, assim, uma ordem de priorização para a satisfação dos requisitos do seu cliente. Esta análise torna-se importante quando há impossibilidade de compatibilidade entre os fatores de processo em relação a dois ou mais requisitos de clientes, ou seja, quando se altera um fator para melhorar

o rendimento de um requisito de cliente em função do deterioramento de outro requisito menos importante.

Em relação aos requisitos de processo, o QFD também apresenta uma escala de priorização para os mesmos baseada nas necessidades e desejos dos clientes. De acordo com o processo de priorização das características do processo do QFD, a velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ) destacou-se com 37% com o principal requisito de processo a ser estudado. Em seguida, o QFD priorizou a corrente de pico ( $I_p$ ) com 28%, o ciclo ativo (CA) com 26% e a corrente de base ( $I_b$ ) com 9%, estabelecendo-se, assim, uma ordem de prioridade para os requisitos de processo. Nesta análise, determinou-se quais fatores são os mais críticos ao sistema (VA,  $I_p$  e CA), conforme o estabelecimento das necessidades dos clientes. Este tem por objetivo eliminar os requisitos de processo que possuem menor importância no sistema de acordo com as necessidades dos clientes, com finalidade de simplificar o procedimento de melhoria no produto. Esta análise torna-se importante quando há impossibilidade da realização de estudos e monitoramentos detalhados de todas as características de processo, seja por motivos financeiros ou técnicos.

Outra observação importante referente aos requisitos de processo a ser ressaltada é a determinação da condição ótima dos valores objetos ou estratégicos para que todas as necessidades dos clientes sejam suplantadas. Estes valores objetos ou estratégicos representam a melhor configuração para os requisitos de processo de acordo com as metas estabelecidas pelos clientes.

## 5.11 Considerações Finais

Todas as etapas, até aqui descritas, fornecem subsídios para o planejamento das melhorias necessárias para que a qualidade do cordão de solda, produzido pela empresa, seja aumentada. Os resultados da matriz desenvolvida apresentam requisitos de processos, que devem ser melhorados a fim de se obterem novas e desejáveis especificações para as necessidades dos clientes.

Uma vez identificados os requisitos de processos críticos, eles devem ser analisados individualmente. Conhecendo-se as características críticas do procedimento, fica fácil definir quais requisitos de processo devem ser melhor monitorados.

## 6. Conclusões e Recomendações

Esse capítulo tem a finalidade de retratar as conclusões deste trabalho de dissertação, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

### 6.1. Conclusão

A seguir, são reapresentados os objetivos principais e os específicos deste trabalho, a fim de que se possa melhor visualizar as conclusões deste trabalho de dissertação.

Considerando os objetivos principais desta dissertação:

- 1- Apresentar um método de determinação da Qualidade Projetada (valores objetos ou estratégicos) na construção de matrizes QFD, utilizando a técnica DOE.

Este objetivo foi alcançado ao se considerar a metodologia apresentada no capítulo 5, que mostra todo o desenvolvimento de uma proposta de integração entre os dois métodos, concluindo que o QFD é uma ferramenta que comporta muito bem uma integração com o DOE.

- 2- Demonstrar que o uso integrado de métodos científicos (DOE) já consagrados pode, dentro do planejamento da qualidade (QFD), aumentar a eficácia, buscando estabelecer critérios menos arbitrários e mais estatísticos.

Este objetivo foi alcançado ao se considerarem os resultados apresentados no capítulo 5, onde se compararam os valores obtidos através do DOE com os determinados por outros métodos de cálculo para os valores objetos ou estratégicos. Conclui-se que os resultados gerados pelo DOE produziram melhores resultados com um nível de confiança da ordem de 95%, o que não pôde ser verificado ao se analisar os outros métodos de cálculo. Um fator importante a ser ressaltado é que o DOE é baseado em procedimentos estatísticos e experimentações, enquanto os outros métodos de cálculo baseiam-se em opiniões de pessoas e de dados coletados a partir de informações disponíveis em artigos ou catálogos. Portanto, o DOE se mostra como um importante instrumento para aumentar a eficácia na determinação dos valores objetivos ou estratégicos, estabelecendo critérios menos arbitrários e mais estatísticos dentro do método QFD. Apesar do método DOE produzir os melhores resultados, os pesquisadores também devem

atentar para opiniões dos especialistas na área, pois, conforme verificado nos resultados da dissertação, este método também produziu resultados satisfatórios. Este fato pode ser verificado quando a opinião do especialista é baseada em pessoas que possuem vasto conhecimento teórico e prático sobre o processo em estudo.

Do estudo dos objetivos principais desta dissertação, pode-se concluir que o QFD é uma ferramenta visual muito eficiente, mas tem, intrinsecamente, algumas deficiências relativas à definição dos valores objetivos ou específicos de suas matrizes. Inúmeras possibilidades são vislumbradas pelos pesquisadores no sentido de potencializar as qualidades deste método de planejamento da qualidade, que procura traduzir a expectativa do cliente a respeito do produto em informações a serem quantificadas e controladas durante a fase de projeto dos novos produtos, sincronizando atributos técnicos do projeto com dimensões da qualidade. O trabalho procurou demonstrar essa integração utilizando uma aplicação no processo MIG pulsado que pode ser, facilmente, assimilado e reproduzido.

Os resultados mostraram que as definições subjetivas da Matriz QFD podem ser reduzidas ao se utilizar a ferramenta estatística DOE. Generalizando-se tais procedimentos, torna-se possível eliminar interpretações subjetivas a respeito dos requisitos dos clientes ao se desenvolverem novos produtos. A abordagem metodológica apresentada propõe uma nova perspectiva para a análise de novos produtos, utilizando-se da experimentação e dos requisitos dos clientes como principais ferramentas. Deste modo, o QFD consegue direcionar os esforços para a melhoria da qualidade de projeto de produtos, processos e serviços, obtendo-se resultados mais precisos e atendendo às necessidades dos clientes.

Considerando os objetivos específicos desta dissertação:

- 1- Confeccionar uma matriz QFD para analisar o processo MIG pulsado, utilizando-se dos parâmetros de pulso como os requisitos de processo, com a finalidade de introduzir os requisitos dos clientes (Qualidade dos cordões de solda).

No que se refere à confecção da matriz QFD, este objetivo também foi alcançado ao se observar os procedimentos de cálculo no capítulo 5 desta dissertação, onde se pôde observar, através da **figura 5.4**, que apresenta a matriz QFD obtida. A matriz QFD priorizou o fator velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ) com 37% e, logo após a corrente de pico ( $I_p$ ), com 28%, o ciclo ativo (CA) com 26% e, em seguida, a corrente de base ( $I_b$ ) com 9%, como sendo o mais significativo ao processo. A classificação apresentada para os parâmetros de pulso pelo

método QFD está de acordo com a literatura, que destaca que a corrente de pico ( $I_p$ ) e a velocidade de alimentação do arame (VA) como os mais importantes fatores, apresentando a corrente de base como um fator de pouca influência e responsável apenas pela manutenção da estabilidade do arco elétrico.

2- Analisar os efeitos dos parâmetros de pulso sobre a qualidade dos cordões de solda em chapas de aço pelo processo MIG pulsado, utilizando, como ferramenta, o DOE.

Mediante a análise dos resultados obtidos para a qualidade dos cordões de solda no processo de soldagem MIG pulsado, obteve-se as seguintes conclusões relevantes aos parâmetros de pulso nas características dos cordões de solda.

A penetração foi considerada como referência pelos clientes para a obtenção de um cordão de solda ideal. Nesta situação, de máxima penetração, os outros requisitos (IC, D e IR) mantiveram-se bastante próximas das condições ideais individuais estabelecidas pelo cliente, obtendo-se uma corrente média de baixa intensidade (192 A), numa transferência tipicamente por *spray*, fato esse que permite a soldagem de chapas finas com pouco dispêndio de energia fornecida ao metal base.

No que se refere à qualidade dos cordões de solda, um fato bastante expressivo, neste trabalho, foi a influência significativa da corrente de pico ( $I_p$ ) sobre todas as características do cordão, seja como fator (P, IC e D) ou interação com outros fatores (IR e IC), fato este verificado pela literatura que enfoca que a corrente de pico é a responsável por garantir uma boa fusão e penetração do cordão. Para a velocidade de alimentação do arame (Va), verificou-se que a mesma possui influência significativa em duas características do cordão, tendo maior influência sobre a penetração (P), fato este que também é salientado pela literatura. Outro fato expressivo, neste trabalho, foi a influência significativa da corrente de base ( $I_b$ ) sobre a penetração (P), sobre o índice de respingos (IR) e sobre o índice de concavidade (IC), contrariando o que havia sido pronunciado pela literatura, onde se enfoca a pouca influência do parâmetro de pulso sobre as características geométricas do cordão, a qual serviria apenas para manter a estabilidade do arco elétrico, devendo ser mantida em valores extremantes baixos. Isso também não foi verificado após a etapa de otimização do experimento, que apresentou uma solução global com uma corrente de pico em seu nível inferior ( $I_p = 280$  A) com os outros parâmetros em seus níveis superiores ( $I_b = 100$  A, CA = 50 % e VA = 6 m/min), como forma de obtenção de uma resposta otimizada para o estudo do processo MIG pulsado e de acordo com os requisitos dos clientes.

Com relação à hipótese inicial do estudo “A utilização da metodologia DOE na determinação dos Valores Objetos irá encontrar a melhor especificação para as Características da Qualidade e/ou Processo, para que se obtenha o melhor desempenho nos requisitos dos clientes em uma matriz QFD”. Baseando-se nos resultados, pode-se afirmar que ela é verdadeira, pois o DOE apresenta os melhores resultados que os outros métodos de cálculo, conforme as metas estabelecidas no início do estudo para os requisitos dos clientes.

## 6.2. Recomendações para Trabalhos Futuros

Durante a execução deste trabalho, foram observados alguns aspectos que, sem dúvida, se aprofundados, trariam grandes contribuições científicas. Por limitações de tempo e sem querer desvirtuar o trabalho de sua proposta original, estes aspectos não foram abordados, mas são deixados aqui como sugestões para temas de trabalhos futuros.

- 1- A aplicação prática foi realizada apenas em uma das matrizes propostas pelo método QFD. No entanto, seria conveniente avaliar a extrapolação da análise do Processo MIG pulsado para as outras matrizes do método QFD.
- 2- Introduzir o DOE como método de análise para determinar as outras definições subjetivas da Matriz QFD (Matriz de relações, ver seção 2.7.4) tendo, como problema de pesquisa, avaliar as interações entre os requisitos de projeto.
- 3- Introduzir, na determinação da prioridade dos requisitos dos clientes (ver seção 2.71), em uma matriz QFD, a Técnica R&R (Reprodutividade e Repetitividade) ou os métodos de lógica difusa para tentar diminuir a subjetividade e a incerteza da opinião dos consumidores, realizando-se, posteriormente, uma comparação entre os métodos de classificação dos requisitos dos clientes.
- 4- Realizar uma outra aplicação do método QFD, onde se observa o uso de DOE na determinação dos valores objetos ou estratégicos, na construção de matrizes QFD, com o objetivo de avaliar a repetibilidade dos resultados.
- 5- Realizar um estudo direcionado e mais abrangente, utilizando o Planejamento Fatorial Completo em três níveis e a técnica denominada superfície de resposta ao processo MIG/MAG pulsado, de forma a produzir uma análise mais apurada dos resultados obtidos.

APÊNDICE A Tabela de dados e cálculos do Experimento

| Std Order | Run Order | Ip (A) | Ib (A) | CA (%) | Va (m/min)    | P (mm) | r (mm) | b (mm)        | IC (%) | Sp (mm <sup>2</sup> ) | Sr (mm <sup>2</sup> ) | D (%) |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 2         | 1         | 350    | 70     | 40     | 6             | 1,66   | 2,71   | 10,90         | 24,86  | 10,67                 | 18,31                 | 36,82 |
| 14        | 2         | 350    | 70     | 50     | 5             | 2,03   | 2,35   | 10,33         | 22,75  | 5,73                  | 16,21                 | 26,12 |
| 4         | 3         | 350    | 100    | 40     | 5             | 0,9    | 2,35   | 9,08          | 25,88  | 4,49                  | 13,30                 | 25,24 |
| 3         | 4         | 280    | 100    | 40     | 6             | 2,24   | 3,20   | 7,43          | 43,07  | 8,56                  | 16,46                 | 34,21 |
| 1         | 5         | 280    | 70     | 40     | 5             | 1,54   | 2,46   | 9,35          | 26,31  | 7,49                  | 14,44                 | 34,15 |
| 16        | 6         | 350    | 100    | 50     | 6             | 0,85   | 2,73   | 12,43         | 21,96  | 7,58                  | 19,53                 | 27,96 |
| 11        | 7         | 280    | 100    | 40     | 6             | 2,08   | 3,05   | 9,05          | 33,70  | 10,25                 | 16,81                 | 37,88 |
| 7         | 8         | 280    | 100    | 50     | 5             | 1,15   | 1,88   | 8,80          | 21,36  | 9,28                  | 10,38                 | 47,20 |
| 6         | 9         | 350    | 70     | 50     | 5             | 1,23   | 2,23   | 8,95          | 24,92  | 7,31                  | 13,55                 | 35,04 |
| 8         | 10        | 350    | 100    | 50     | 6             | 1,05   | 2,60   | 11,08         | 23,47  | 7,73                  | 17,00                 | 31,26 |
| 5         | 11        | 280    | 70     | 50     | 6             | 2,61   | 2,61   | 9,85          | 26,50  | 12,40                 | 16,68                 | 42,64 |
| 9         | 12        | 280    | 70     | 40     | 5             | 1,85   | 2,55   | 9,30          | 27,42  | 10,04                 | 14,78                 | 40,45 |
| 12        | 13        | 350    | 100    | 40     | 5             | 0,58   | 1,48   | 11,33         | 13,06  | 4,50                  | 9,63                  | 31,85 |
| 10        | 14        | 350    | 70     | 40     | 6             | 2,03   | 2,74   | 10,58         | 25,90  | 11,31                 | 19,01                 | 37,30 |
| 15        | 15        | 280    | 100    | 50     | 5             | 0,88   | 2,10   | 11,40         | 18,42  | 7,10                  | 13,44                 | 34,57 |
| 13        | 16        | 280    | 70     | 50     | 6             | 2,03   | 2,81   | 10,00         | 28,10  | 9,95                  | 18,26                 | 35,27 |
|           |           |        |        |        | <b>Média</b>  | 1,54   |        | <b>Media</b>  | 25,48  |                       | <b>Media</b>          | 34,87 |
|           |           |        |        |        | <b>máximo</b> | 2,61   |        | <b>máximo</b> | 43,07  |                       | <b>máximo</b>         | 47,20 |
|           |           |        |        |        | <b>mínimo</b> | 0,58   |        | <b>mínimo</b> | 13,06  |                       | <b>mínimo</b>         | 25,24 |

Tabela 1- Tabela de dados e cálculos do Experimento

APÊNDICE A - Tabela de dados e cálculos do Experimento

| Std Order        | Run Order                | Ip (A) | Ib (A) | CA (%) | Va (m/min) | m <sub>f</sub> (g) | m <sub>0</sub> (g) | L cm   | V cm <sup>3</sup> | m <sub>t</sub> (g) | IR (%)        |       |
|------------------|--------------------------|--------|--------|--------|------------|--------------------|--------------------|--------|-------------------|--------------------|---------------|-------|
| 2                | 1                        | 350    | 70     | 40     | 6          | 533,30             | 524,10             | 108,00 | 1,22              | 9,40               | 2,08          |       |
| 14               | 2                        | 350    | 70     | 50     | 5          | 493,60             | 481,40             | 152,00 | 1,72              | 13,22              | 7,74          |       |
| 4                | 3                        | 350    | 100    | 40     | 5          | 496,40             | 485,60             | 142,00 | 1,61              | 12,35              | 12,57         |       |
| 3                | 4                        | 280    | 100    | 40     | 6          | 530,10             | 518,50             | 135,00 | 1,53              | 11,74              | 1,23          |       |
| 1                | 5                        | 280    | 70     | 40     | 5          | 497,20             | 488,70             | 110,00 | 1,24              | 9,57               | 11,17         |       |
| 16               | 6                        | 350    | 100    | 50     | 6          | 506,20             | 493,60             | 168,00 | 1,90              | 14,61              | 13,79         |       |
| 11               | 7                        | 280    | 100    | 40     | 6          | 526,70             | 510,80             | 193,00 | 2,18              | 16,79              | 5,30          |       |
| 7                | 8                        | 280    | 100    | 50     | 5          | 499,00             | 488,30             | 142,00 | 1,61              | 12,35              | 13,38         |       |
| 6                | 9                        | 350    | 70     | 50     | 5          | 499,60             | 489,80             | 127,00 | 1,44              | 11,05              | 11,30         |       |
| 8                | 10                       | 350    | 100    | 50     | 6          | 485,70             | 475,00             | 163,00 | 1,84              | 14,18              | 24,54         |       |
| 5                | 11                       | 280    | 70     | 50     | 6          | 501,30             | 487,00             | 182,00 | 2,06              | 15,83              | 9,68          |       |
| 9                | 12                       | 280    | 70     | 40     | 5          | 531,20             | 520,00             | 138,00 | 1,56              | 12,00              | 6,71          |       |
| 12               | 13                       | 350    | 100    | 40     | 5          | 502,00             | 491,60             | 142,00 | 1,61              | 12,35              | 15,81         |       |
| 10               | 14                       | 350    | 70     | 40     | 6          | 537,70             | 523,20             | 173,00 | 1,96              | 15,05              | 3,65          |       |
| 15               | 15                       | 280    | 100    | 50     | 5          | 492,20             | 479,60             | 157,00 | 1,78              | 13,66              | 7,75          |       |
| 13               | 16                       | 280    | 70     | 50     | 6          | 494,00             | 476,30             | 223,00 | 2,52              | 19,40              | 8,76          |       |
| <b>Densidade</b> | 7,692 kg/cm <sup>2</sup> |        |        |        |            |                    |                    |        |                   |                    | <b>Media</b>  | 9,71  |
| <b>Diâmetro</b>  | 0,12 cm                  |        |        |        |            |                    |                    |        |                   |                    | <b>máximo</b> | 24,54 |
|                  |                          |        |        |        |            |                    |                    |        |                   |                    | <b>mínimo</b> | 1,23  |

Tabela 2- Tabela de dados e cálculos do Experimento

## ANEXO A

Tabela de Classificação dos projetos experimentais

|   |                        |   |
|---|------------------------|---|
| Completamente Aleatorizado com um único fator | Tipo de Aplicação      | Quando somente um fator experimental está sendo usado   |
|   | Estrutura              | O efeito do fator é estudado por meio da alocação ao acaso das unidades experimentais aos níveis do fator. A ordem dos ensaios é realizada de modo aleatório. Os blocos estão ausentes.   |
|   | Informações fornecidas | - estimativas e comparações das médias dos tratamentos ou efeito do fator;<br>- estimativa da variância do erro.  |
|   | Modelo                 | $y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$ , para $i = 1, 2, \dots, a$ e $j = 1, 2, \dots, n$ , onde $y_{ij}$ é a $ij$ -ésima observação, $\mu$ é a média geral, $\tau_i$ é o efeito do $i$ -ésimo tratamento, e $\varepsilon_{ij}$ é o erro aleatório.               |
| Blocos aleatorizados                          | Tipo de Aplicação      | Quando o efeito de um fator está sendo estudado e é necessário controlar a variabilidade provocada por fatores perturbadores conhecidos. Estes fatores perturbadores (material experimental, tempo, pessoas, etc.) são divididos em blocos ou grupos homogêneos.      |
|   | Estrutura              | São tomadas observações correspondentes a todos os tratamentos (níveis do fator) em cada bloco. Usualmente são formados blocos em relação a um único fator perturbador.   |
|   | Informações fornecidas | - estimativas e comparações dos efeitos dos tratamentos livres dos efeitos do bloco;<br>- estimativa dos efeitos do bloco;<br>- estimativa da variância do erro.  |
|   | Modelo                 | $y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ , para $i = 1, 2, \dots, a$ e $j = 1, 2, \dots, b$ , onde $\mu$ é a média geral, $\tau_i$ é o efeito do $i$ -ésimo tratamento, $\beta_j$ é o efeito do $j$ -ésimo bloco e $\varepsilon_{ij}$ é o erro aleatório. |
| Blocos incompletos balanceados                | Tipo de Aplicação      | Quando todos os tratamentos não podem ser acomodados em um bloco.   |
|   | Estrutura              | Os tratamentos testados em cada bloco são selecionados de forma balanceada: dois tratamentos quaisquer aparecem juntos em um mesmo bloco o mesmo número de vezes que qualquer outro par de tratamentos.   |
|   | Informações fornecidas | Idêntico ao projeto em blocos aleatorizados. Os efeitos de todos os tratamentos são estimados com igual precisão.   |

|   |                        |   |
|---|------------------------|---|
|   | Modelo                 | $y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ , onde $y_{ij}$ é a $i$ -ésima observação do $j$ -ésimo bloco, $\mu$ é a média geral, $\tau_i$ é o efeito do $i$ -ésimo tratamento, $\beta_j$ é o efeito do $j$ -ésimo bloco e $\varepsilon_{ij}$ é o erro aleatório.  |
| Blocos incompletos parcialmente balanceados | Tipo de Aplicação      | Quando um projeto de blocos incompletos balanceados necessita de um número de blocos excessivamente grande.   |
|   | Estrutura              | Alguns pares de tratamentos aparecem juntos $\lambda_1$ vezes, outros pares aparecem juntos $\lambda_2$ vezes, ..., e os pares restantes aparecem juntos $\lambda_n$ vezes.   |
|   | Informações fornecidas | Idêntico ao projeto de blocos aleatorizados, mas os efeitos dos tratamentos são estimados com diferentes precisões.   |
|   | Modelo                 | $y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ , onde $\mu$ é a média geral, $\tau_i$ é o efeito do $i$ -ésimo tratamento, $\beta_j$ é o efeito do $j$ -ésimo bloco e $\varepsilon_{ij}$ é o erro aleatório.  |
| Fatorial                                    | Tipo de Aplicação      | Quando vários fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e suas interações podem ser importantes.   |
|   | Estrutura              | Em cada repetição completa do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são estudadas. A alocação das unidades experimentais aos tratamentos e a ordem de realização dos ensaios são feitas de modo aleatório. Os blocos estão ausentes.  |
|   | Informações fornecidas | - estimativas e comparações dos efeitos dos fatores principais;<br>- estimativas dos possíveis efeitos de interações;<br>- estimativa da variância do erro.   |
|   | Modelo                 | $y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$ , para $i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, c$ e $l = 1, 2, \dots, n$ ; onde $\mu$ é o efeito da média geral, $\tau_i$ é o efeito do $i$ -ésimo nível do fator A, $\beta_j$ é o efeito do $j$ -ésimo nível do fator B, $\gamma_k$ é o efeito do $k$ -ésimo nível do fator C, $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre os fatores A e B, ..., e $\varepsilon_{ijkl}$ é o erro aleatório. |
| Fatorial $2^k$ em blocos                    | Tipo de Aplicação      | Quando o número de ensaios necessários para o planejamento com $k$ fatores em 2 níveis é muito grande para que sejam realizados sob condições homogêneas (blocos). Nesse caso o experimento é dividido em subconjuntos homogêneos. Os blocos surgem geralmente como consequência de restrições de tempo, homogeneidade de materiais, etc.   |
|   | Estrutura              | O conjunto completo de tratamentos é dividido em subconjuntos de modo que as interações de ordem mais alta são confundidas com os blocos. São tomadas observações em todos os blocos.   |

|   |                        |  |
|---|------------------------|--|
|   | Informações fornecidas | - fornece as mesmas estimativas do projeto fatorial, exceto algumas interações de ordem mais alta que não podem ser estimadas porque estão confundidas com os blocos.  |
|   | Modelo                 | É o mesmo utilizado no projeto de experimento tipo fatorial.   |
| <b>Fatorial <math>2^k</math> fracionado</b> | Tipo de Aplicação      | Quando existem muitos fatores ( $k$ muito grande) e não é possível coletar observações em todos os tratamentos   |
|   | Estrutura              | Vários fatores são estudados em dois níveis, mas somente um subconjunto do fatorial completo é executado. A formação de blocos algumas vezes é possível.   |
|   | Informações fornecidas | - estimativas e comparações dos efeitos de vários fatores;<br>- estimativa de certos efeitos de interação (alguns efeitos podem não ser estimáveis);<br>- certos projetos fatoriais fracionados (quando $k$ é pequeno) não fornecem informações suficientes para estimar variância.  |
|   | Modelo                 | É o mesmo utilizado no fatorial.   |
| <b>Quadrados de Youden</b>                  | Tipo de Aplicação      | Similares aos quadrados latinos, mas os números de linhas, colunas e tratamentos não precisam ser iguais.  |
|   | Estrutura              | Cada tratamento ocorre uma vez em cada linha. O número de tratamentos deve ser igual ao número de colunas. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras.   |
|   | Informações fornecidas | Idêntico ao projeto de quadrados latinos.  |
|   | Modelo                 | $y_{ijh} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \beta_h + \varepsilon_{ijh}$ , para $i, j$ e $h = 1, 2, \dots, p$ ; onde $\mu$ é a média geral, $\alpha_i$ é o $i$ -ésimo efeito do bloco, $\tau_j$ é o $j$ -ésimo efeito do tratamento, $\beta_h$ é o $h$ -ésimo efeito de posição e $\varepsilon_{ij}$ é o erro aleatório.  |
| <b>Quadrados latinos</b>                    | Tipo de Aplicação      | Quando um fator de interesse está sendo estudado e os resultados podem ser afetados por duas outras variáveis experimentais ou por duas fontes perturbadoras (variáveis de blocos). É suposta a ausência de interações entre estas variáveis.  |
|   | Estrutura              | Os tratamentos são distribuídos em correspondência às colunas e linhas de um quadrado. Cada tratamento aparece uma vez em cada linha e uma vez em cada coluna. O número de níveis deve ser igual ao número de linhas e colunas do quadrado. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras, as quais correspondem às colunas e linhas do quadrado. |
|   | Informações fornecidas | - estimativas e comparações dos efeitos dos tratamentos livres dos efeitos das duas variáveis de bloco;  |

|                         |                        |   |
|-------------------------|------------------------|---|
|                         |                        | - estimativas e comparações dos efeitos das duas variáveis de bloco;<br>- estimativa da variância do erro.  |
|                         | Modelo                 | $y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \beta_k + \varepsilon_{ij(k)}$ , para $i, j$ e $k = 1, 2, \dots, p$ ; onde $y_{ij}$ é a observação correspondente a $i$ -ésima linha, a $j$ -ésima coluna, do $k$ -ésimo tratamento, $\mu$ é a média geral, $\alpha_i$ é o $i$ -ésimo efeito da linha, $\tau_j$ é o $j$ -ésimo efeito do tratamento, $\beta_k$ é o $k$ -ésimo efeito da coluna e $\varepsilon_{ijk}$ é o erro aleatório. |
| Hierárquico ou Aninhado | Tipo de Aplicação      | Experimentos com vários fatores onde os níveis de um fator (B) são similares, mas não idênticos para diferentes níveis de outro fator (A). Ou seja, o $j$ -ésimo nível de B quando A está no nível 1 é diferente do $j$ -ésimo nível de B quando A está no nível e assim por diante.  |
|                         | Estrutura              | Os níveis do fator B estão “aninhados” sob os níveis do fator A.  |
|                         | Informações fornecidas | - estimativas e comparações dos efeitos dos fatores principais e das interações, exceto a interação do fator aninhado.<br>- estimativa da variância do erro.  |
|                         | Modelo                 | $y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{(ij)k}$ , para $i = 1, 2, \dots, a$ ; $j = 1, 2, \dots, b$ e $k = 1, 2, \dots, n$ ;   |
| Superfícies de Resposta | Tipo de Aplicação      | O objetivo consiste em fornecer mapas empíricos ou gráficos de contorno. Estes mapas ilustram a forma pela qual os fatores, que podem ser controlados pelo pesquisador, influenciam a variável de resposta.   |
|                         | Estrutura              | Os níveis dos fatores são vistos como pontos no espaço de fatores (muitas vezes multidimensional) no qual a resposta será registrada.   |
|                         | Informações fornecidas | Mapas que ilustram a natureza e a forma da superfície.  |
|                         | Modelo                 | É um polinômio de primeira ou segunda ordem, conforme a relação entre as variáveis em estudo.   |

Adaptação de Juran (1988) *apud* Pizzolato (2002).