

**APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE  
DE EXPERIMENTOS NA MELHORIA DA QUALIDADE DE UM  
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS PLÁSTICOS**

**EDWIN VLADIMIR CARDOZA GALDÁMEZ**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: **Prof. Dr. LUIZ C. R. CARPINETTI**

São Carlos  
julho / 2002

*À minha mãe pelo incentivo de estudar no Brasil;  
Aos meus avôs pelas orações e palavras de carinho;  
À Isabela pela paciência, carinho, companheirismo e força;  
Agradeço de coração.*

***Agradecimentos:***

Ao Prof. Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti pela amizade, conselhos e orientação em momentos decisivos do presente trabalho;

Aos diretores e funcionários da empresa, pela colaboração e disponibilidade de repassar todas as informações no desenvolvimento do trabalho;

Ao Prof. Marcelo Nagano, pelas observações pertinentes no exame de qualificação;

Aos professores do departamento de Engenharia de Produção, que através das aulas ministradas contribuíram no desenvolvimento deste trabalho;

A Simone pelo incentivo, horas de conversa no laboratório e correções do texto;

Aos meus amigos, pelo apoio e contribuição em algum momento dessa longa jornada;

Aos funcionários do departamento de Engenharia de Produção e Biblioteca central da Escola de Engenharia de São Carlos, pelas informações e serviços prestados;

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo financiamento deste projeto.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	I
LISTA DE TABELAS .....	II
LISTA DE QUADROS .....	III
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	IV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
RESUMO .....	VI
ABSTRACT.....	VII
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO .....	3
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	4
1.4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO E METODOLOGIA DE PESQUISA .....	6
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
2 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS.....	9
2.1 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO NO DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS .....	9
2.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS .....	10
2.2.1 CONCEITOS GERAIS DE EXPERIMENTAÇÃO.....	11
2.2.2 PROCESSO PARA CONDUZIR OS EXPERIMENTOS .....	13
2.3 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS .....	19
2.3.1 PLANEJAMENTO FATORIAL.....	19
2.3.2 PLANEJAMENTO FATORIAL $2^k$ .....	21
2.3.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS EFEITOS DO EXPERIMENTO FATORIAL $2^k$ ....	28
2.3.4 PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONADO $2^{k-p}$ .....	35
2.4 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	39
2.4.1 EXPERIMENTO FATORIAL $2^k$ PARA AJUSTAR A SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	44
2.4.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: EXPERIMENTO $2^k$ .....	47
2.4.3 ANÁLISE CANÔNICA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	53
3 EXPERIMENTOS INDUSTRIAIS.....	56

3.1	ESTUDO DE UM PROCESSO INDUSTRIAL .....	56
3.2	EMPRESA ESTUDADA.....	56
3.3	PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE MATERIAIS .....	57
3.4	DEFINIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO.....	62
3.5	PROCESSO DE MOLDAGEM PLÁSTICA POR INJEÇÃO.....	64
3.5.1	INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	64
3.5.2	PROBLEMAS DO PROCESSO DE MOLDAGEM PLÁSTICA POR INJEÇÃO.....	68
3.6	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS .....	72
3.6.1	SELEÇÃO DOS FATORES DE CONTROLE E OS NÍVEIS DO PROCESSO .....	72
3.6.2	SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA.....	74
3.7	REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO: PRIMEIRA RODADA .....	75
3.7.1	MATRIZ DE PLANEJAMENTO .....	75
3.7.2	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	77
3.8	REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO: SEGUNDA RODADA .....	84
3.8.1	MATRIZ DE PLANEJAMENTO .....	84
3.8.2	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	86
3.9	REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO: TERCEIRA RODADA .....	91
3.9.1	MATRIZ DE PLANEJAMENTO .....	91
3.9.2	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	93
3.10	REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO: QUARTA RODADA .....	95
3.10.1	MATRIZ DE PLANEJAMENTO .....	95
3.10.2	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	96
3.10.2.1	ANÁLISE CANÔNICA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	100
3.11	CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS EXPERIMENTOS.....	104
4	CONCLUSÃO .....	105
4.1	CONCLUSÃO .....	105
4.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	109
	ANEXOS .....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1</b> - MODELO GERAL DE UM SISTEMA DE TRANSFORMAÇÃO.....	3
<b>FIGURA 1.2</b> - CONSUMO DE RESINAS TERMOPLÁSTICAS NO BRASIL (1996-2000).....	5
<b>FIGURA 1.3</b> - METODOLOGIA DE PESQUISA .....	7
<b>FIGURA 2.1</b> - DIFERENTES CATEGORIAS DOS FATORES .....	15
<b>FIGURA 2.2</b> - ROTEIRO PARA CONDUÇÃO DE EXPERIMENTOS.....	17
<b>FIGURA 2.3</b> - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS, PLANEJAMENTO FATORIAL $2^k$ .....	25
<b>FIGURA 2.4</b> - GRÁFICOS DE EFEITOS DE INTERAÇÃO.....	25
<b>FIGURA 2.5</b> - REGIÕES DE REJEIÇÃO E NÃO-REJEIÇÃO PARA UMA DISTRIBUIÇÃO F...31	
<b>FIGURA 2.6</b> - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA TRIDIMENSIONAL PLANA .....	42
<b>FIGURA 2.7</b> - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA TRIDIMENSIONAL NÃO PLANA.....	43
<b>FIGURA 2.8</b> - PLANEJAMENTO FATORIAL $2^2$ , COM PONTOS CENTRAIS.....	45
<b>FIGURA 2.9</b> - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL.47	
<b>FIGURA 2.10</b> - GRÁFICOS DE CONTORNO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	54
<b>FIGURA 3.1</b> - ETAPAS DO PROCESSO DE EXTRUSÃO .....	60
<b>FIGURA 3.2</b> - ESQUEMA DE UMA EXTRUSORA SIMPLES .....	60
<b>FIGURA 3.3</b> - PROCESSO DE ROTOMOLDAGEM.....	61
<b>FIGURA 3.4</b> - COMPONENTE PLÁSTICO.....	63
<b>FIGURA 3.5</b> - PROCESSO DE MOLDAGEM PLÁSTICA POR INJEÇÃO .....	64
<b>FIGURA 3.6</b> - CICLO DE MOLDAGEM .....	65
<b>FIGURA 3.7</b> - DEFEITOS NO COMPONENTE PLÁSTICO .....	69
<b>FIGURA 3.8</b> - DIAGRAMA DE CAUSA-EFEITO .....	72
<b>FIGURA 3.9</b> - ESCALA NÚMERICA .....	75
<b>FIGURA 3.10</b> - GRÁFICOS DE PROBABILIDADE NORMAL - EXP I.....	79
<b>FIGURA 3.11</b> - GRÁFICOS DE EFEITOS PRINCIPAIS DOS FATORES - EXP I.....	80
<b>FIGURA 3.12</b> - GRÁFICOS DE PROBABILIDADE NORMAL - EXP II.....	88
<b>FIGURA 3.13</b> - GRÁFICOS DE EFEITOS PRINCIPAIS DOS FATORES - EXP II.....	90
<b>FIGURA 3.14</b> - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	99
<b>FIGURA 3.15</b> - GRÁFICO DE CONTORNOS: PRESSÃO INJEÇÃO $\times$ TEMP MÁQUINA ....	100

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 2.1</b> - MATRIZ DE PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO FATORIAL $2^3$ .....	22
<b>TABELA 3.1</b> - FICHA TÉCNICA DO PROCESSO DE INJEÇÃO PLÁSTICA .....	73
<b>TABELA 3.2</b> - NÍVEIS DOS FATORES DE CONTROLE: PRIMEIRA RODADA.....	74
<b>TABELA 3.3</b> - EXPERIMENTO FATORIAL FRACIONADO $2^{6-2}$ .....	76
<b>TABELA 3.4</b> - RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO.....	77
<b>TABELA 3.5</b> - EFEITOS PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO DOS FATORES - EXP I .....	78
<b>TABELA 3.6</b> - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS EFEITOS PRINCIPAIS - EXP I.....	82
<b>TABELA 3.7</b> - SOMA DE QUADRADOS DOS EFEITOS DE INTERAÇÃO - EXP I.....	83
<b>TABELA 3.8</b> - NÍVEIS DOS FATORES DE CONTROLE: SEGUNDA RODADA.....	85
<b>TABELA 3.9</b> - EXPERIMENTO FATORIAL FRACIONADO $2^{5-1}$ .....	85
<b>TABELA 3.10</b> - RESULTADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO.....	86
<b>TABELA 3.11</b> - EFEITOS PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO DOS FATORES - EXP II .....	87
<b>TABELA 3.12</b> - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP II, $F_{0,1, 1,10} = 3,29$ .....	89
<b>TABELA 3.13</b> - NÍVEIS DOS FATORES DE CONTROLE: TERCEIRA RODADA.....	92
<b>TABELA 3.14</b> - EXPERIMENTO FATORIAL $2^2$ , COM PONTOS CENTRAIS .....	92
<b>TABELA 3.15</b> - RESULTADO DO TERCEIRO EXPERIMENTO .....	93
<b>TABELA 3.16</b> - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP III, $F_{0,01, 1, 4} = 21,20$ .....	94
<b>TABELA 3.17</b> - EXPERIMENTO FATORIAL $2^2$ COMPOSTO CENTRAL.....	96
<b>TABELA 3.18</b> - RESULTADOS DO QUARTO EXPERIMENTO.....	97
<b>TABELA 3.19</b> - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP IV, $F_{0,01, 1, 4} = 21,20$ .....	97
<b>TABELA 3.20</b> - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP IV, $F_{0,01, 1, 4} = 21,20$ .....	98
<b>TABELA 3.21</b> - PONTO ESTACIONÁRIO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....	100
<b>TABELA 3.22</b> - NÍVEIS ÓTIMOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....	102
<b>TABELA 3.23</b> - CONFIRMAÇÃO DO PONTO ESTACIONÁRIO .....	103

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 2.1</b> - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO ROTEIRO EXPERIMENTAL .....	18
<b>QUADRO 2.2</b> - EXPERIMENTO FATORIAL DE DOIS FATORES, CASO GERAL.....	20
<b>QUADRO 2.3</b> - ANOVA DE UM EXPERIMENTO FATORIAL COM DOIS FATORES .....	33
<b>QUADRO 2.4</b> - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UM EXPERIMENTO $2^k$ .....	34
<b>QUADRO 2.5</b> - EXPERIMENTO FATORIAL $2^3$ .....	37
<b>QUADRO 2.6</b> - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA, FATORIAL $2^2$ ..	50
<b>QUADRO 3.1</b> - POSSÍVEIS SOLUÇÕES NA INJEÇÃO DO POLIPROPILENO .....	70



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	- <i>Analyses of variance</i>
ASQ	- <i>American Society for Quality</i>
CEP	- Controle Estatístico do Processo
DOE	- <i>Design of Experiments</i>
eq.	- Equação
gl.	- Graus de liberdade
INP	- Instituto Nacional do Plástico
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
MSR	- Metodologia de Superfície de Resposta
MTO	- <i>Make to order</i>
PC	- Policarbonato
PEAD	- Polietileno de alta densidade
PET	- Polietileno tereftato
PP	- Polipropileno
PVC	- Policloreto de vinila
MS	- Quadrado médio
R&R	- Reprodutividade & Repetibilidade
SS	- Soma de quadrados
SQ	- Soma quadrática das respostas
VT/P	- Porca de acionamento

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$	- erro experimental
$\mu$	- média geral
$\alpha$	- nível de significância
$\alpha_1$	- ponto axial do experimento
$^{\circ}\text{C}$	- graus Celsius
$a$	- níveis do fator A
$b$	- níveis do fator B
$\bar{y}_c$	- média das respostas do ponto central
$F$	- Estatística crítica Fisher
$\bar{y}_f$	- média das respostas do experimento fatorial
$F_0$	- Estatística estimada com os experimentos industriais
$H_1$	- Hipótese alternativa
$H_0$	- Hipótese nula
$k$	- número de fatores
$n$	- número de réplicas
$n_c$	- número de pontos centrais
$n_f$	- número de pontos do experimento fatorial utilizado
$T$	- soma total de observações
$x_i$	- fatores experimentais
$y_i$	- total das observações no $i$ -ésimo nível de um fator
$\beta_i$	- coeficientes do polinômio algébrico
$\eta$	- superfície de resposta
$\xi_i$	- nível da variável natural

## RESUMO

GALDÁMEZ, E.V.C. (2002). *Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos*. São Carlos, 133p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Experimentos industriais são realizados pelas empresas no intuito de melhorar as características de qualidade dos produtos e processos de fabricação. Nesse sentido, esta dissertação tem como objetivo estudar e aplicar as técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade industrial. Como parte do objetivo, desenvolve-se uma aplicação com as técnicas de planejamento Fatorial Fracionado  $2^{k-p}$ , Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Variância, em um processo de moldagem por injeção, utilizado por uma indústria que fabrica e comercializa componentes plásticos usados na construção civil. Com essa pesquisa experimental identificam-se os parâmetros mais importantes da injeção plástica: Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção. Ao mesmo tempo, determinam-se os níveis ótimos de regulação desses parâmetros. Assim, com esse estudo, avalia-se o procedimento de implantação das técnicas de experimentação e as dificuldades práticas encontradas, bem como busca-se contribuir na integração entre universidade e empresa.

**Palavras-chave:** *experimentos industriais; fatoriais fracionados  $2^{k-p}$ ; metodologia de superfície de resposta; processo de moldagem por injeção plástica.*

## ABSTRACT

GALDÁMEZ, E.V.C. (2002). *Application design of experiments in the injection molding process*. São Carlos, 133p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Industrial experiments are made by companies in order to improve the quality characteristics of products and production processes. In this sense, the objective of this dissertation is to study and apply the design of experiments in the industrial quality improvement. In addition, as a part of the objective, an application of the techniques of design Fractional Factorial  $2^{k-p}$ , Analysis of Variance and Response Surface Methodology is done. It is focused in an injection molding process applied by a company, that makes and trades plastic products for the civil construction. Using this experimental study, the most important parameters of plastic injection are identified: melt temperature and injection pressure. At the same time, the optimal levels of adjustment of these parameters are determined. From this study, it is evaluated both the implantation procedures of the designs of experiments as well as the difficulties faced. Also, this study tries to contribute to the university-company relationship.

**Keywords:** *industrial experiments, factorial fractional  $2^{k-p}$ , response surface methodology; injection molding process.*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Um estudo realizado 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” (ANNUAL QUALITY CONGRESS, 2000). Tal pesquisa descreve que inovação, flexibilidade e velocidade serão os fatores críticos para o sucesso das empresas em adquirir vantagem competitiva. Ainda, ressalta que as empresas terão um desafio maior ao adotar esses novos valores, porque os consumidores têm uma visão diferente e quase incomum desses conceitos.

TAGUCHI et al. (1990) definem qualidade, em termos gerais, como “*as perdas impostas à sociedade a partir do momento em que o produto é liberado para a venda*”. Isso significa que no instante em que o produto fica à disposição do consumidor, qualquer alteração nas suas características funcionais ou físicas afetará sua qualidade, proporcionando prejuízos maiores às empresas do que seu próprio custo de fabricação, ou seja, quanto menor for essa perda, mais desejável é o produto para a sociedade.

Essas perdas ocorrem porque a qualidade do produto é vista sob enfoques diferentes por consumidores e projetistas (TAGUCHI, 1993; PHADKE, 1989). Os consumidores pouco se preocupam com as restrições de uso do produto (especificada pelos projetistas), mas demonstram muita insatisfação com as falhas ou a falta de segurança no momento de usar. Outros fatores que também influenciam nas perdas das características dos produtos, citados por MONTGOMERY (1991) e HAHN et al. (1998), são os fatores inerentes ao processo, como os parâmetros de controle e de ruído (são as fontes não controláveis dos processos produtivos).

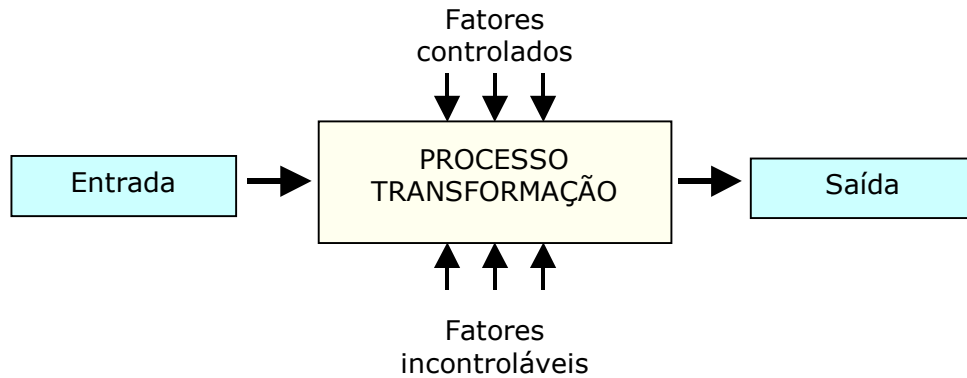
A história da qualidade relata que os conceitos estatísticos assumiram um papel importante nas empresas. Segundo CHEW (1957), estatística é a arte de adquirir conhecimento através da coleta, análise e interpretação de informações. Nas empresas essa ciência é transformada em ferramentas de qualidade (Seis Sigma, Projeto de Experimentos - *Design of Experiment*, Análise de Variância - ANOVA, Controle Estatístico do Processo - CEP, Metodologia de Superfície de Resposta – MSR e Reprodutividade & Repetibilidade - R&R), que podem contribuir na melhoria contínua dos produtos ou processos de fabricação.

Recentemente, um dos métodos utilizados para se melhorar e controlar as informações dos indicadores que refletem a qualidade dos produtos, processos e atividades de transação de uma empresa é o Seis Sigma. O principal objetivo dessa metodologia é incorporar as ações de melhoria e mudanças organizacionais à estratégia competitiva da empresa através dos conceitos estatísticos (HOERL, 2001).

Nesse contexto, o projeto de experimentos apresenta-se como uma das formas para se alcançar as características de competitividade ou os fatores críticos citados pela ASQ (inovação, flexibilidade e velocidade), além de atender as necessidades e as expectativas dos consumidores (ELSAYED et al. 1993; MONTGOMERY, 1991; PHADKE, 1989).

O planejamento de experimentos deve-se a Ronald A. Fisher, que durante alguns anos foi responsável pela estatística e análise de dados na Estação Agrícola Experimental em Londres - Inglaterra. Fisher foi quem desenvolveu e usou pela primeira vez a técnica de ANOVA (*Analysis of variance*) como ferramenta primária para a análise estatística do projeto experimental. Outros autores que contribuíram de maneira significativa para a evolução das técnicas sobre o projeto de experimentos são: Yates, Box, Bose, Kempthorne e Cochran (MONTGOMERY, 1991).

O experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada (*inputs*) do processo ou sistema, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saída (*outputs*). O processo ou sistema de transformação é representado pela combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam uma entrada em produtos acabados ou semi-acabados, com características ou parâmetros específicos, conforme Figura 1.1.



**FIGURA 1.1** - MODELO GERAL DE UM SISTEMA DE TRANSFORMAÇÃO  
Fonte: MONTGOMERY (1991).

Segundo MONTGOMERY (1991), as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos, etc). BUTTON (2001), descreve que esse objetivo geral pode ser dividido em outros objetivos secundários:

- identificar as variáveis (fatores de controle) do processo que mais influem nos parâmetros de resposta de interesse;
- atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que a variabilidade da resposta de interesse seja mínima ou que o valor do resultado (parâmetro de qualidade) seja próximo do valor nominal;
- atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

## 1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo geral desta dissertação é estudar as técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade industrial. Ainda como parte do objetivo, pretende-se desenvolver uma aplicação dessas técnicas na melhoria da qualidade de um processo de moldagem por injeção plástica.

Esse objetivo geral pode ser desdobrado nos seguintes objetivos intermediários:

- Estudar e compreender as técnicas de planejamento e análise de experimentos;
- Estudar e compreender os processos produtivos de produtos plásticos;
- Identificar quais são os parâmetros de controle do processo de moldagem plástica por injeção que mais ocasionam problemas de qualidade aos produtos, assim como, determinar quais são os melhores valores de ajustagem desses parâmetros para minimizar os problemas;
- Avaliar o processo de implantação das técnicas e as dificuldades práticas encontradas;
- Contribuir com o processo de integração universidade-empresa.

### **1.3 Justificativa do trabalho**

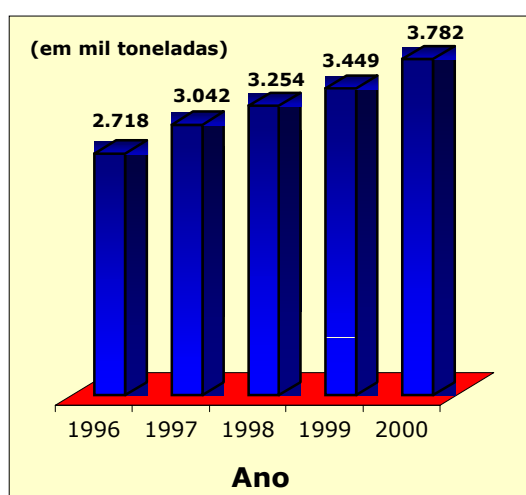
Segundo as pesquisas realizadas por KRUGLIANSKAS (1995), as técnicas experimentais são pouco difundidas nas empresas brasileiras. O trabalho demonstra que apesar do avanço das metodologias de gestão e de melhoria de qualidade usadas para aumentar o desempenho operacional e administrativo das organizações, existem deficiências técnicas específicas relacionadas ao desenvolvimento de projetos de produtos e processos de fabricação. Segundo o autor essas deficiências ocorrem pela falta de conhecimento estatístico, que comumente os gerentes, funcionários e engenheiros das empresas enfrentam ao usar ferramentas estatísticas de qualidade.

Quando as informações dos experimentos são analisadas estatisticamente, garante-se que o produto será projetado com robustez às variações decorrentes do próprio processo de fabricação, meio ambiente e usuário. Ainda, a análise estatística é importante porque uma pequena diferença entre as especificações técnicas de um produto ou nos níveis de ajustagem dos fatores de controle de um processo de fabricação, podem significar um número maior de defeitos (conseqüentemente



perdas econômicas ocorrem) ou resultados mais satisfatórios podem ser alcançados pelas empresas.

Além dessa questão, um estudo realizado pela Associação Brasileira da Indústria de Plástico e publicado pelo jornal Gazeta Mercantil (O PLÁSTICO invade automóveis e caminhões, 2002), demonstra a importância econômica, social e tecnológica que o setor de plástico têm no país. Percebe-se que nos últimos anos (1996 - 2000), os produtos utilizados e comercializados por diferentes setores da indústria nacional: construção civil, calçados, brinquedos, agricultura, utilidades domésticas, além dos setores que empregam tecnologias mais sofisticadas, como os de saúde, embalagens, eletroeletrônicos, aviação e automobilístico, entre outros, vêm sendo fabricados cada vez mais com diferentes resinas termoplásticas. A evolução do consumo desses materiais é apresentado na Figura 1.2.



**FIGURA 1.2** - CONSUMO DE RESINAS TERMOPLÁSTICAS NO BRASIL (1996-2000)  
Fonte: O PLÁSTICO invade automóveis e caminhões (2002).

Segundo o INP (INSTITUTO NACIONAL DO PLÁSTICO, 2002), esse consumo é produzido pelo avanço tecnológico na produção das resinas, pela redução do peso dos produtos, leveza, facilidade de moldagem, a exigência de peças mais recicláveis, ISO 14000, custo de aplicação e pelas vantagens comerciais que esses produtos representam para economia nacional.

Desta forma, o estudo e aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimento na melhoria da qualidade de um processo de injeção plástica, torna-se importante porque a empresa conseguirá baixar os custos de produção. Com isso, ela garante vantagens competitivas (a organização pode ampliar as margens de descontos, adquirir novos equipamentos, exportar produtos, conquistar novos clientes, etc.) no disputado mercado de resinas termoplásticas. Ainda, com o projeto contribui-se no processo de divulgação das técnicas de planejamento e análise de experimentos nas indústrias do país.

#### **1.4 Desenvolvimento do trabalho e metodologia de pesquisa**

Os estudos realizados por HOPPEN et al. (1996), TRIVIÑOS (1992), DANE (1990) e GIL (1988) demonstram que todas as pesquisas ou trabalhos científicos podem ser classificados de acordo com os objetivos propostos, para encontrar a resposta ou a solução de um problema. Em geral, esses autores descrevem três grupos de estudo, exploratórios, descritivos e explicativos (experimentais). Dentre esses estudos, o explicativo é o processo formal que melhor define o método científico utilizado no presente trabalho.

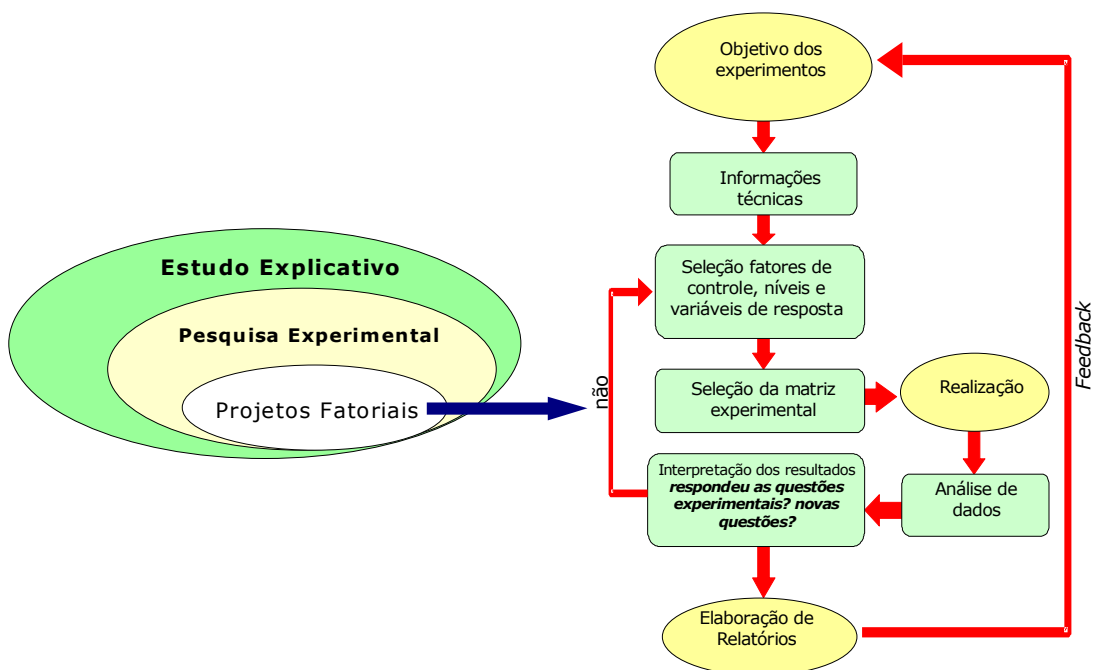
Os estudos explicativos são utilizados para identificar os fatores que contribuem ou influenciam a ocorrência de um fenômeno, ou também para determinar através da razão, o fundamento das coisas (GIL, 1988). Nesses estudos, vários métodos são utilizados como meio científico de validar ou rejeitar as hipóteses formuladas. Na área de ciências sociais são utilizados os métodos observacional e quase-experimental. Enquanto, que nas áreas de ciências naturais é utilizado o método experimental.

Dentro do estudo explicativo o projeto é classificado como uma pesquisa experimental, que consiste “...em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 1988).

A técnica de coleta das informações utilizada é denominada de *Projetos fatoriais com duas ou mais variáveis independentes* (REY, 1993; DANE, 1990). Neste caso, experimentos são realizados, para determinar os efeitos principais e as

eventuais interações entre as variáveis ou fatores de controle, no meio natural ou no campo de experimentação (experimentos realizados nas próprias empresas).

Todas as etapas desenvolvidas nesta dissertação, representadas pela Figura 1.3, se adequam à metodologia de pesquisa experimental (Projeto Fatoriais) descrita na literatura por REY (1993); HOPPEN et al. (1996); DANE (1990) e GIL (1988) e pelos autores ANTONY et al. (1998); WERKEMA & AGUIAR (1996); TAGUCHI (1993) e MONTGOMERY (1991), que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos. Desta forma, esse processo experimental será abordado com mais detalhes nos capítulos 2 e 3.



**FIGURA 1.3 - METODOLOGIA DE PESQUISA**

Fonte: Adaptado de HAALAND et al. (1993) e ANTONY et al. (1998).

## 1.5 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está estruturada em quatro (4) capítulos. Os três (3) capítulos subseqüentes ao primeiro descrevem o seguinte:

O **capítulo 2** apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos das técnicas de planejamento e análise de experimentos utilizados para o desenvolvimento do

trabalho. Assim como, apresenta a metodologia utilizada para realizar os experimentos industriais.

O **capítulo 3** descreve o planejamento e a análise estatística dos experimentos industriais realizados na empresa. Ao mesmo tempo, são apresentadas as características de vários processos de transformação de resinas termoplásticas utilizados por uma empresa.

O **capítulo 4** finaliza o trabalho com uma discussão geral sobre os benefícios e limitações práticas do projeto, assim como apresenta algumas propostas de trabalhos futuros.

## 2 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

### 2.1 Técnicas de planejamento no desenvolvimento de projetos

Segundo SLACK et al. (1997), o projeto de um produto envolve cinco etapas: geração do conceito, triagem, projeto preliminar, avaliação/melhoria e prototipagem/projeto final. Na etapa de geração do conceito, as idéias oriundas de várias fontes (consumidores, concorrência, vendas, departamento de pesquisa e desenvolvimento - P&D, etc.) são transformadas em conceitos. Segundo os autores, “conceitos são diferentes de idéias pelo fato de serem declarações transparentes que englobam a idéia e também indicam sua forma, função, objetivo e benefício globais”. Na segunda etapa, são verificadas a viabilidade, a aceitabilidade e a vulnerabilidade do conceito. Esses pontos, dependendo da organização, podem ser avaliados por várias funções, tais como marketing, produção e finanças. O projeto preliminar que corresponde à terceira etapa apresenta a especificação dos produtos e processos de fabricação. Na etapa de avaliação e melhoria, o projeto preliminar sofre várias considerações no intuito de se avaliar as melhorias que podem ser feitas antes do lançamento no mercado. Finalmente na última etapa, o projeto melhorado é transformado num protótipo passível de teste para então ser finalizado e colocado no mercado.

As etapas do projeto do produto expostas por SLACK et al. (1997), são também denominadas de estágios de desenvolvimentos de produtos e envolvem as seguintes atividades: definição dos objetivos dos produtos, desenvolvimento do produto, projeto do processo de fabricação, a produção, a comercialização (vendas) e o serviço de garantia pós-venda (TAGUCHI, 1993).

As técnicas de planejamento de experimentos podem ser utilizadas nas etapas de projeto preliminar, projeto do produto e processo de fabricação e na etapa

de avaliação e melhoria. Nessas fases, muitas vezes, torna-se necessário analisar a influência de um ou mais fatores. Quando for avaliado apenas o efeito de um fator nas respostas do produto ou processo de fabricação, recomenda-se utilizar a técnica de planejamento de experimentos completamente aleatorizados ou a técnica de planejamento de experimentos em blocos aleatorizados, descritas por OLIVEIRA (1999), WERKEMA & AGUIAR (1996), MONTGOMERY (1991) e JURAN et al. (1951).

Por outro lado, quando se torna importante investigar o efeito provocado nas respostas dos experimentos por dois ou mais fatores de controle e, cada um deles com dois ou mais níveis de regulagens, JURAN et al. (1951) e MONTGOMERY (1991) recomendam o uso de técnicas clássicas de planejamento, como por exemplo: técnica de planejamento fatorial completo, fatorial fracionado ou experimentos com pontos centrais. Outra metodologia que é bastante aplicada na indústria é o método Taguchi. Essa técnica experimental foi desenvolvida, a partir das técnicas clássicas de experimentos, entre os anos de 1950 e 1960 pelo engenheiro japonês G. Taguchi (TAY & BUTLER, 1999).

## **2.2 Princípios básicos de planejamento e análise de experimentos**

Nos processos de fabricação das indústrias existem vários fatores e níveis de regulagens, que influenciam as características de qualidade dos produtos e um problema comum encontrado pelas empresas ao realizar experimentos, é a necessidade de estudar simultaneamente o efeito desses fatores com diferentes níveis de regulagens. Neste caso, observa-se que o número de testes requeridos para a experimentação tende a crescer à medida que a quantidade de fatores aumenta. Isso torna os experimentos industriais inviáveis nas empresas, porque os custos e o tempo de execução são elevados.

Ao mesmo tempo experimentos industriais são realizados pelas empresas, principalmente, para se resolver os problemas críticos do produto ou processos de fabricação. Com esses testes procura-se reduzir o número de produtos com defeitos fabricados e responder a uma série de questões relacionadas aos níveis e parâmetros que influenciam o desempenho do produto final. ANTONY et al. (1998),

COLEMAN & MONTGOMERY (1993), MONTGOMERY (1991) e STEINBERG & HUNTER (1984) sugerem que a solução dos problemas pode ser alcançada com mais facilidade quando os experimentos são planejados e as respostas analisadas com métodos ou técnicas estatísticas.

Nesse sentido, BARKER (1985) ressalta que ao realizar as atividades (definição dos objetivos, parâmetros do produto ou processo de fabricação, seleção dos fatores de controle e variáveis de resposta, seleção da matriz experimental, realização do experimento, análise de dados, interpretação dos resultados e elaboração de relatórios) dos experimentos industriais de forma planejada, as informações obtidas dos produtos ou dos processos de fabricação tornam-se mais confiáveis e, com isso ações de melhoria mais eficientes podem ser tomadas pelos funcionários das empresas.

### 2.2.1 Conceitos gerais de experimentação

A seguir apresenta-se alguns conceitos e termos fundamentais para a aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos industriais (OLIVEIRA, 1999; WERKEMA & AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1991; JURAN et al. 1951).

**Variáveis de resposta:** são as variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são introduzidos propositalmente nos fatores que regulam ou ajustam os processos de fabricação. Nos experimentos, podem existir uma ou mais variáveis de resposta ( $y$ ) que são importantes de se avaliar.

**Fatores de Controle:** estes são os fatores alterados deliberadamente no experimento. O objetivo principal de introduzir estímulos nos fatores de controle é avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e, com isso poder determinar os principais fatores do processo. JURAN et al. (1951) dividem os fatores de controle em quantitativos (pressão de injeção, temperatura, velocidade, etc.) e qualitativos (diferentes máquinas, operadores, liga/desliga, etc.). Nos experimentos, os fatores podem ser representados por números arábicos (1, 2, 3....) ou por letras (A, B, C....).

**Fatores de Ruído:** são os fatores, conhecidos ou não, que influenciam nas variáveis de resposta do experimento. Cuidados especiais devem ser tomados na hora de realizar os testes com esses fatores, pois, é importante evitar que os efeitos produzidos pelos fatores de controle, fiquem misturados ou mascarados com os efeitos provocados pelos fatores de ruído.

**Níveis dos fatores:** são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Os níveis são identificados por nível baixo (-1) e nível alto (+1). Segundo OLIVEIRA (1999), é comum considerar como nível baixo o menor valor, quando os fatores forem ajustados por níveis quantitativos.

**Tratamentos:** é a combinação dos níveis de fatores de controle, isto significa que cada uma das corridas do experimento representará um tratamento.

**Efeito principal:** é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado.

**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 construído para conduzir os experimentos. Nesta matriz são incluídos os fatores de controle, os níveis e tratamentos do experimento.

**Aleatorização:** é o processo de definir a ordem dos tratamentos da matriz experimental, através de sorteios ou por limitações específicas dos testes. Esse conceito também se refere ao processo de alocação do material e equipamento às diferentes condições de experimentação.

A aleatorização nos experimentos é realizada para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não-controláveis nas respostas analisadas e para se atender aos requisitos dos métodos estatísticos, os quais exigem que os componentes do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes (CHEW, 1957).



**Repetição:** é o processo de repetir cada uma das combinações (linhas) da matriz experimental sob as mesmas condições de experimentação. Segundo MONTGOMERY (1991), este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental, que é utilizado para determinar se as diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas.

**Blocos:** é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não-controláveis) dos experimentos. Com esta técnica procura-se criar um experimento (grupo ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas.

Nas próximas seções é descrito o procedimento experimental usado para realizar a parte prática do estudo, descrita no capítulo 3. As etapas desse plano ou método de pesquisa são propostas por diversos autores que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos (OLIVEIRA, 1999; WERKEMA & AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1991; MYERS et al. 1989; BOX & DRAPER, 1987; STEINBERG & HUNTER, 1984; JURAN et al. 1951).

### 2.2.2 Processo para conduzir os experimentos

Antes de iniciar qualquer experimentação, é importante estabelecer o planejamento dos testes. WERKEMA & AGUIAR (1996), COLEMAN & MONTGOMERY (1993) e MONTGOMERY (1991) ressaltam a importância do domínio do problema por todas as pessoas envolvidas e recomendam que durante os experimentos, o processo seja cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com os planos, pois erros no procedimento experimental muito provavelmente invalidarão os resultados.

Vários autores (ANTONY, et al. 1998; HOPPEN, et al. 1996; WERKEMA & AGUIAR, 1996; REY, 1993; COLEMAN & MONTGOMERY, 1993; MONTGOMERY, 1991; DANE, 1990; GIL, 1988) recomendam que durante o processo de experimentação seja feito um plano estratégico para coordenar as

atividades. A seguir, apresenta-se as atividades do procedimento experimental, descrito por esses autores:

**1. Definição dos objetivos do experimento:** nesta fase inicial é importante definir os problemas dos produtos e processos de fabricação, os objetivos do experimento e principalmente, selecionar uma equipe que seja responsável por todas as atividades do processo experimental. WERKEMA & AGUIAR (1996) lembram que as pessoas envolvidas devem ser conscientizadas sobre a importância de analisar cientificamente os fatores que influenciam no produto ou processo de fabricação, enquanto que GUEDES (1996) e COLEMAM & MONTGOMERY (1993) recomendam que *brainstorming* sejam realizados com as pessoas das áreas de controle da qualidade, manufatura, P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) ou qualquer outra que possa contribuir com informações relevantes aos experimentos (publicações, experiências e resultados práticos de outros experimentos).

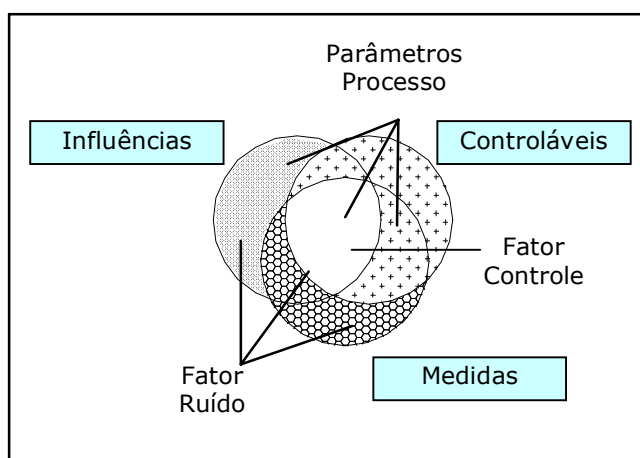
Ao realizar o *brainstorming*, todas as idéias ou informações coletadas devem ser criticamente examinadas pela equipe responsável. Segundo ANTONY et al. (1998), é natural que as pessoas descrevam vários problemas nos produtos ou processos de fabricação e, neste caso, outras ferramentas como os gráficos de Pareto e o diagrama Causa e Efeito podem ser utilizadas para se identificar os principais problemas (SMITH, 1998; BOX & BISGAARD, 1987; ISHIKAWA, 1976).

**2. Parâmetros do experimento:** esta fase envolve a coleta de informações técnicas do produto ou processo de fabricação, na qual, as pessoas devem listar todos os fatores de controle, fatores de ruído, os níveis de ajustagem e as variáveis de resposta. Nessa fase, segundo MONTGOMERY (1991), as informações técnicas podem resultar de uma combinação entre o conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo.

**3. Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta:** nesta fase a equipe deve selecionar os fatores de controle (variáveis independentes), as faixas de variação dos níveis de ajustagem desses fatores e as respostas do experimento (variáveis dependentes), assim como, definir o método de medição dos fatores de

controle e a escala numérica que será utilizada para se avaliar as respostas do experimento definidas nas fases anteriores.

COLEMAN & MONTGOMERY (1993) sugerem que nesta fase os parâmetros do processo sejam classificados por categorias (grau de influência na resposta, capacidade de se controlar ou capacidade de se medir - precisão), apresentadas na Figura 2.1. Esse esquema pode ajudar a selecionar e a priorizar os fatores críticos que afetam as respostas do experimento.



**FIGURA 2.1** - DIFERENTES CATEGORIAS DOS FATORES  
Fonte: COLEMAN & MONTGOMERY (1993)

**4. Seleção da matriz experimental:** segundo MONTGOMERY (1991), se as três etapas anteriores foram seguidas corretamente, esta quarta etapa será relativamente simples de realizar. Ao selecionar ou construir a 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 definidas as seqüências das corridas (aleatoriamente), o número de replicas, as restrições dos experimentos e as possíveis interações que possam vir a ocorrer entre os fatores que estão sendo avaliados. Algumas das técnicas de planejamento de experimentos que podem ser utilizadas nesta fase, são descritas nas próximas seções.

**5. Realização do experimento:** nesta etapa é importante que o processo seja acompanhado pela equipe ou por um responsável, para assegurar-se que todos os

procedimentos sejam executados conforme o plano. HOPPEN et al. (1996) ressaltam que, qualquer mudança no momento em que os experimentos são realizados deve ser registrada (datas, ensaios adicionais, alteração na seqüência das corridas, etc.) e recomendam que relatórios sejam apresentados no final da experimentação, visto que, essas informações podem enriquecer os resultados obtidos pela análise de dados e verificar se os experimentos foram corretamente executados pelo responsável.

Outro aspecto importante que deve ser considerado durante a realização dos experimentos, é o equilíbrio dos recursos de experimentação disponíveis. MONTGOMERY (1991) considera a pesquisa experimental como um processo iterativo, ou seja, as informações reunidas da primeira rodada de teste são utilizadas como dados de entrada da segunda rodada e por isso, cuidados devem ser tomados para não esgotar todos os recursos na primeira rodada do experimento.

**6. Análise de dados:** nesta etapa podem ser utilizados softwares estatísticos (MINITAB, EXCEL, STATISTICA), que ajudam a usar as técnicas de planejamento e análise de experimentos, os gráficos lineares e os gráficos de probabilidade normal (WERKEMA & AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1991).

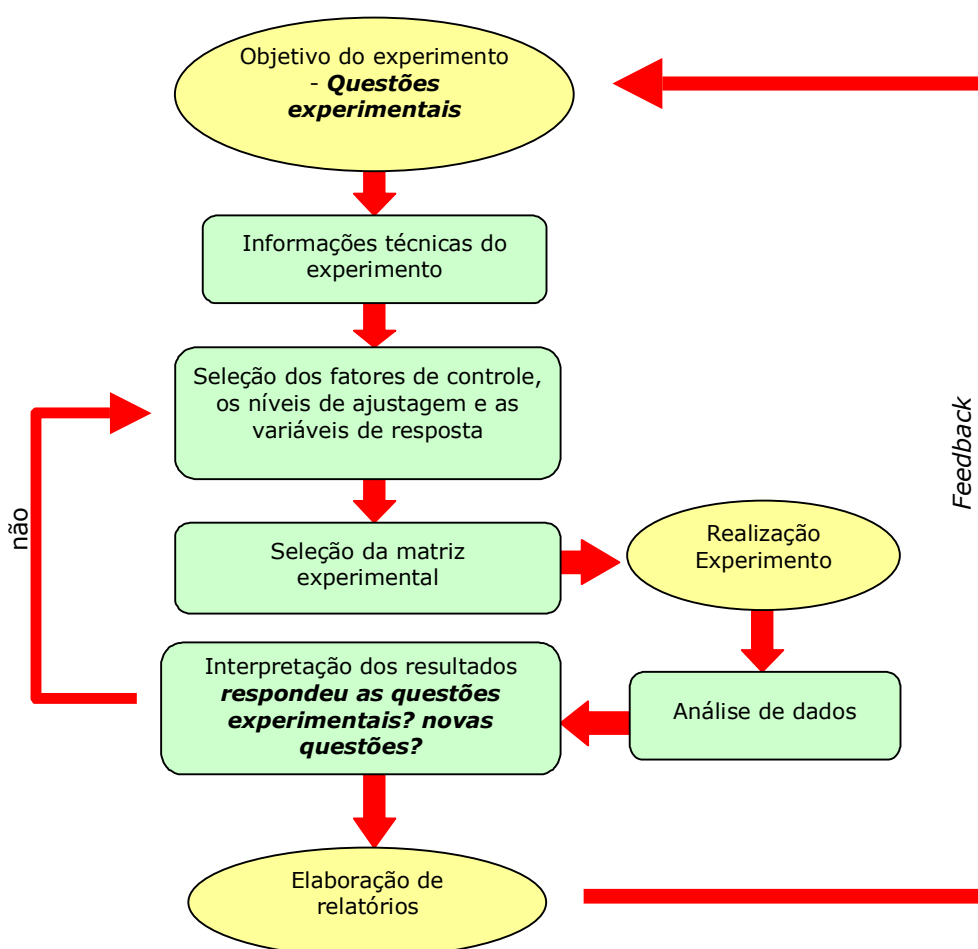
Os conceitos estatísticos são aplicados nos resultados de um experimento, para descrever o comportamento das variáveis de controle, a relação entre elas e para estimar os efeitos produzidos nas respostas observadas. Ainda, a análise estatística permite tomar decisões quanto à aceitar ou rejeitar as hipóteses formuladas na primeira etapa dos experimentos (REY, 1993).

**7. Interpretação dos resultados:** ao finalizar a etapa anterior, as pessoas responsáveis pelo plano de atividades, devem extrair as conclusões práticas dos resultados e recomendar as ações de melhorias contínua do processo de fabricação. Uma prática comum nesta fase, é descrever os resultados através de gráficos, especialmente quando são apresentados às pessoas externas ao projeto.

Ainda, as pessoas devem questionar se as respostas satisfazem as questões experimentais definidas na primeira etapa, ou formular novas questões experimentais, revisando as fases anteriores.

**8. Elaboração de relatórios:** WERKEMA & AGUIAR (1996) ressaltam que o trabalho realizado deve ser descrito, identificando-se as limitações práticas e teóricas encontradas, as recomendações para futuros experimentos e as conclusões obtidas. A obtenção desse *feedback* pode ser de grande benefício, para o processo de avaliação do desempenho dos experimentos industriais, como também, para o processo de revisão (YUKIMURA, 1991). Esta etapa é importante porque demonstra que o estudo desenvolvido é um processo contínuo de aprendizado (MONTGOMERY, 1991).

Assim, a parte prática desta dissertação é baseada no roteiro apresentado anteriormente, o qual é representado pela Figura 2.2. Segundo HAHN (1993), esse plano experimental ajuda a desenvolver e conduzir efetivamente as atividades já definidas e, principalmente, permite maximizar as respostas das questões formuladas pela equipe de trabalho.



**FIGURA 2.2 - ROTEIRO PARA CONDUÇÃO DE EXPERIMENTOS**

Fonte: Adaptado de HAALAND & O'CONNELL (1993) e ANTONY et al. (1998).

A metodologia descrita anteriormente, foi utilizada por ANTONY et al. (1998), para realizar experimentos industriais em cinco diferentes processos de fabricação (fabricação de produtos por moldagem plástica, processo de soldagem, processo de lapidação de cilindros, fabricação de radiografias e fabricação de fios elétricos). Nesse trabalho, são apresentadas as vantagens e as limitações da metodologia, conforme o Quadro 2.1.

**QUADRO 2.1 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO ROTEIRO EXPERIMENTAL**  
Fonte: ANTONY et al. (1998)

VANTAGENS	LIMITAÇÕES
<p>Melhora a comunicação entre as pessoas (engenheiros, gerentes e pesquisadores) que formam a equipe responsável por conduzir os experimentos industriais.</p> <p>Com o uso da metodologia foi possível converter os problemas de qualidade dos processos industriais, em conceitos estatísticos.</p> <p>Com o plano experimental foi possível passar novas informações (conceitos estatísticos) aos funcionários. Com isso, a interpretação dos resultados dos experimentos industriais foi melhorada.</p> <p>Foi possível selecionar uma matriz experimental, para cada situação prática (cinco processos industriais de manufatura).</p> <p>Não é necessário um treinamento intensivo dos funcionários da empresa para utilizar as técnicas de planejamento e análise de experimentos.</p> <p>Informações (relatórios) ficam disponíveis para consulta nos próximos experimentos industriais.</p>	<p>A metodologia foi desenvolvida para fatores de dois níveis, utilizando-se as técnicas de planejamento fatorial e projeto robusto.</p> <p>A metodologia foi desenvolvida para características de qualidade estáticas e não características dinâmicas.</p> <p>A análise e interpretação dos experimentos industriais, usando superfície de resposta, não foram incorporados na metodologia, pela complexidade de análise dos resultados desses experimentos.</p>

Nas próximas seções são descritas algumas técnicas de planejamento e análise de experimentos (experimento fatorial, fatorial fracionado  $2^{k-p}$ , metodologia

de superfície de resposta e análise de variância). É importante ressaltar que não é a intenção deste trabalho, abordar todas as técnicas que existem na literatura. Outras formas de planejar e analisar experimentos industriais são descritas por OLIVEIRA (1999), WERKEMA & AGUIAR (1996), MONTGOMERY (1991), MYERS et al. (1989), BARKER (1985), STEINBERG & HUNTER (1984), CHEW (1957) e JURAN et al. (1951).

### **2.3 Técnicas de planejamento e análise de experimentos**

Os experimentos industriais devem ser planejados em uma matriz experimental. A construção dessa matriz corresponde a etapa nº 4 (quatro) do roteiro para conduzir os ensaios, apresentado anteriormente. O objetivo dessa atividade é garantir que as informações obtidas sejam confiáveis e que os recursos (equipamentos, pessoas, materiais e informações) disponíveis para experimentação sejam bem utilizados (OLIVEIRA, 1999; COLEMAN & MONTGOMERY, 1993; MONTGOMERY, 1991). Nesta fase do projeto experimental diversas técnicas de planejamento e análise de experimentos podem ser utilizadas, conforme será descrito a seguir.

#### **2.3.1 Planejamento fatorial**

Ao planejar os experimentos industriais com a técnica fatorial, considera-se que todos os tratamentos da matriz experimental são realizados pela equipe responsável por esta atividade (BOX & BISGAARD, 1987). Segundo BUTTON (2001), o planejamento fatorial é indicado para a fase inicial do procedimento experimental quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável resposta escolhida. Ainda, “é um modelo de efeitos fixos, isto é, a análise dos efeitos provocados pelos fatores não pode ser transferida para outros níveis que não os analisados no planejamento”.

Para ilustrar o procedimento dessa técnica considere-se um experimento com dois fatores (A e B), cada um desses parâmetros serão testados com  $a$  níveis para o fator A e  $b$  níveis para o fator B. Assim, nesse experimento existem  $ab$

combinações de teste. A matriz de planejamento para o experimento fatorial de dois fatores de controle, nos níveis  $a$  e  $b$ , é representada pelo Quadro 2.2. Essa organização também representa o caso geral do experimento fatorial de dois fatores, para uma resposta ( $y_{ijk}$ ) observada quando o fator A está no  $i$ -ésimo nível ( $i = 1, 2, \dots, a$ ). É importante ressaltar que as  $abn$  observações do experimento devem ser realizadas aleatoriamente (MONTGOMERY, 1991).

**QUADRO 2.2** - EXPERIMENTO FATORIAL DE DOIS FATORES, CASO GERAL  
Fonte: MONTGOMERY (1991).

		Fator B			
		Níveis	1	2	...
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	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$	...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	:	:	:	:	:
	$a$	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$	...	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

Segundo DEVOR et al. (1992) e MONTGOMERY (1991), com o experimento organizado dessa forma é possível verificar se:

- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator A;
- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator B;
- a interação dos fatores (coluna $\times$ linha) altera significativamente a resposta.

Os autores também definem que o modelo estatístico do planejamento fatorial é dado pela eq. (2.1).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.1)$$

sendo que,

$\mu$  é a média dos resultados

$\tau_i$  é o efeito principal do fator A,

$\beta_j$  é o efeito principal do fator B,

$(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito da interação dos fatores A e B;

$\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental



Um dos métodos que pode ser utilizado para determinar os coeficientes da eq. (2.1) é a Análise de Variância (ANOVA), que também pode ser utilizada para verificar se esses efeitos são significativos nas repostas (apresentada na próxima seção).

No planejamento de experimentos fatoriais é comum encontrar experimentos planejados com as técnicas fatoriais com dois, três ou mais níveis. Entretanto, no presente trabalho, não serão abordados os testes executados em três níveis ou mais, visto que, os experimentos industriais realizados na empresa foram em dois níveis. Esse tipo de planejamento e alguns exemplos de como conduzir experimentos industriais com essas técnicas fatoriais são ilustrados por OLIVEIRA (1999); DEVOR et al. (1992); MONTGOMERY (1991) e COCHRAN & COX (1957).

### 2.3.2 Planejamento fatorial $2^k$

Segundo JURAN et al. (1951), um experimento fatorial com  $k$  fatores, cada um deles com dois (2) níveis, é denominado de experimento fatorial  $2^k$ . O processo experimental dessa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para em seguida, determinar e interpretar os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e assim, poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação.

Para ilustrar o procedimento dessa técnica considere-se um experimento com três fatores ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ), cada um desses parâmetros foi testado com dois níveis (-1, +1). Esse exemplo é apresentado por vários autores que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos (DEVOR et al., 1992; MONTGOMERY, 1991; BOX & BISGAARD, 1987).

Assim, a matriz de planejamento para o experimento fatorial  $2^3$  é representada pela Tabela 2.1. A respostas de cada ensaio ou tratamento é descrita pela coluna  $y_i$ . É importante ressaltar que a ordem de realização do teste é definida aleatoriamente.

**TABELA 2.1 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO FATORIAL  $2^3$**   
 Fonte: DEVOR et al. (1992) e MONTGOMERY (1991).

N Teste	Fatores de controle			Ordem do Teste	Resposta ( $y_i$ )
	$x_1$	$x_2$	$x_3$		
1	-1	-1	-1	6	$y_1$
2	+1	-1	-1	8	$y_2$
3	-1	+1	-1	1	$y_3$
4	+1	+1	-1	2	$y_4$
5	-1	-1	+1	5	$y_5$
6	+1	-1	+1	3	$y_6$
7	-1	+1	+1	4	$y_7$
8	+1	+1	+1	7	$y_8$

O procedimento que pode ser utilizado para construir a matriz genérica do experimento fatorial  $2^k$  é descrito por DEVOR et al. (1992). Na matriz de planejamento as colunas representam o conjunto de fatores investigados ( $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_k$ ), e as linhas representam os diferentes níveis ou as combinações dos fatores (níveis codificados -1 (mínimo) e +1 (máximo)).

1. Para  $x_1$ , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, ....., ou seja, o sinal dessa coluna alterna em grupos de  $2^0 = 1$ .
2. Para  $x_2$ , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, ....., ou seja, o sinal dessa coluna alterna em grupos de  $2^1 = 2$ .
3. Para  $x_3$ , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, ....., ou seja, o sinal dessa coluna alterna em grupos de  $2^2 = 4$ .
4. Para  $x_4$ , o sinal alterna em grupos de oito ( $2^3 = 8$ ).
5. O procedimento será igual para  $x_5, x_6, \dots, x_k$ . Para  $x_k$ , o sinal alterna em grupos de  $2^{(k-1)}$ , ou seja,  $2^{(k-1)}$  vezes (-1), seguido de  $2^{(k-1)}$  vezes (+1).

DEVOR et al. (1992) definem que esta forma de organizar o experimento é chamada de ordem padrão (*standard order*). Ainda, ressaltam que com esse arranjo garante-se que todas as colunas da matriz sejam ortogonais entre si. Com esse tipo de planejamento é possível determinar os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes produzem nas respostas.

Segundo MONTGOMERY (1991), o modelo estatístico do experimento fatorial  $2^3$  é dado pela eq. (2.2).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta_{ij}) + (\tau\gamma_{ik}) + (\beta\gamma_{jk}) + (\tau\beta\gamma_{ijk}) + \varepsilon_{ijk} \quad (2.2)$$

sendo que,

$\mu$  é a média dos resultados

$\tau_i$  é o efeito principal do fator  $x_1$ ,

$\beta_j$  é o efeito principal do fator  $x_2$ ,

$\gamma_k$  é o efeito principal do fator  $x_3$ ,

$(\tau\beta_{ij})$  é o efeito de interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_2$ ,

$(\tau\gamma_{ik})$  é o efeito de interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_3$ ,

$(\beta\gamma_{jk})$  é o efeito de interação entre os fatores  $x_2$  e  $x_3$ ,

$(\tau\beta\gamma_{ijk})$  é o efeito de interação dos fatores  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ,

$\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental

A seguir é apresentado o método generalizado que pode ser utilizado para estimar os efeitos principais e de interação dos fatores. Esse método é descrito por DEVOR et al. (1992) e MONTGOMERY (1991) e também é conhecido como método de sinais (OLIVEIRA, 1999).

Os efeitos principais correspondem à mudança da resposta média quando o nível de um fator é alterado de (-1) para (+1), mantendo os outros fatores constantes. O procedimento consiste em multiplicar os resultados da coluna  $y_i$  pelos valores  $\pm 1$  associados a coluna  $x_i$  da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se deseja estimar (Tabela 2.1). Em seguida, os valores obtidos devem ser somados e divididos pela metade do número de ensaios realizados, conforme é ilustrado pela eq. (2.3).

$$E_i = \Sigma y_i * x_i / (N/2) \quad (2.3)$$

sendo que  $E_i$  será o efeito estimado,  $N$  é o número total de observações,  $\Sigma y_i * x_i$  é a soma dos resultados ( $y_i$ ) do experimento multiplicados pela coluna  $x_i$ .

Para determinar o efeito de interação, primeiramente devem ser construídas as colunas das interações da matriz de planejamento. Essas colunas são formadas por meio da multiplicação das colunas dos efeitos principais. Por exemplo, para estimar o efeito de interação  $E_{12}$ , serão multiplicadas as colunas dos fatores  $x_1$  e  $x_2$ . Em seguida, os valores  $\pm 1$  associados à coluna  $x_1x_2$  da matriz experimental são utilizados para estimar o efeito de interação, conforme descrito anteriormente pela eq. (2.3).

É importante ressaltar que outros métodos (ex. o algoritmo de Yates para o planejamento  $2^k$ ) podem ser utilizados para calcular os efeitos, conforme apresentados por OLIVEIRA (1999); DEVOR et al. (1992); MONTGOMERY (1991) e JURAN et al. (1951).

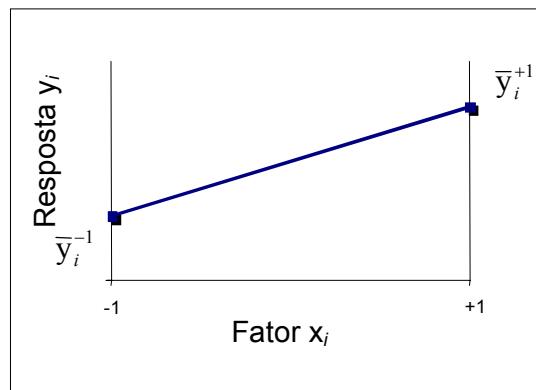
No entanto, nesta etapa dos experimentos alguns autores comentam que embora seja simples estimar esses efeitos, muitas vezes é difícil definir qual é realmente o fator de controle que produz uma diferença significativa nas respostas e na maioria das vezes necessita-se usar os gráficos lineares (que representam os efeitos principais e de interação) e de probabilidade normal (DEVOR et al., 1992; MONTGOMERY, 1991). Nessa fase do procedimento experimental podem ser utilizados diferentes softwares para construir os gráficos (planilha EXCEL, STATISTICA, MINITAB). Os autores também recomendam que para se concluir sobre os efeitos principais e de interação dos fatores é necessário aplicar técnicas de análise de variância (ANOVA). Essa técnica será discutida na próxima seção.

Para representar e interpretar graficamente os efeitos principais e de interação é necessário definir duas propriedades, conforme segue (DEVOR et al., 1992).

- o sinal ( $\pm$ ) indica a direção do efeito, isto é, se a resposta aumenta ou decresce com a variação do nível de (-1) para (+1);

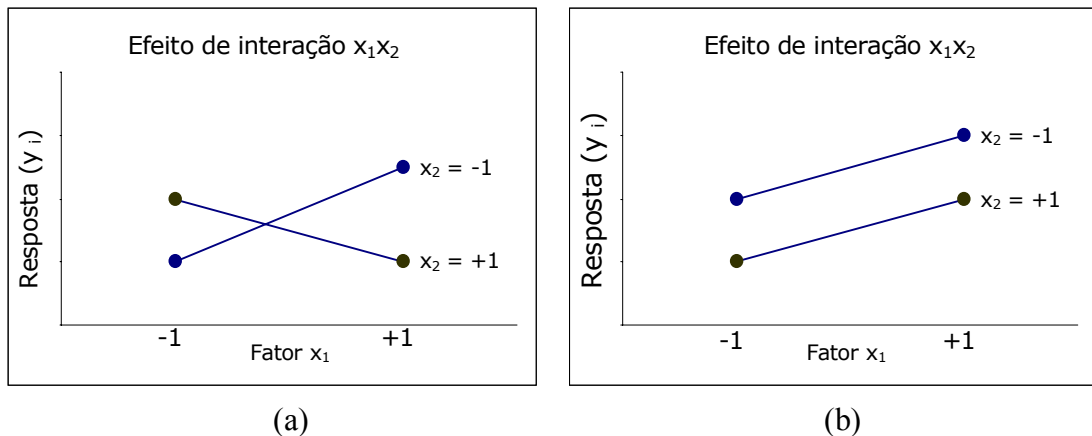
- a magnitude indica a intensidade do efeito.

A forma gráfica do efeito principal ( $E_i$ ) é representado pela Figura 2.3. Esse gráfico linear ilustra a variação média das respostas em função da mudança no nível (-1, +1) de um fator ( $x_i$ ), mantendo os outros fatores constantes (Tabela 2.1).



**FIGURA 2.3** - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS, PLANEJAMENTO FATORIAL  $2^k$

Os gráficos dos efeitos de interação descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores. Por exemplo, a Figura 2.4(a) ilustra que o efeito provocado pela mudança de nível do fator  $x_1$  na resposta depende do nível do fator  $x_2$ , portanto, existe interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_2$ . A Figura 2.4(b) demonstra que o efeito provocado pela mudança do nível do fator  $x_1$  na resposta é independente do nível do fator  $x_2$ , portanto não existe interação entre esses fatores.



**FIGURA 2.4** - GRÁFICOS DE EFEITOS DE INTERAÇÃO

Outro tipo de gráfico que pode ser utilizado na análise de experimentos é o de probabilidade normal. Esses gráficos são utilizados nas situações onde não é possível repetir um experimento fatorial  $2^k$ , e é importante obter uma estimativa independente do erro experimental para julgar a importância dos efeitos principais e de interação (DEVOR et al., 1992). Esse tipo de erro é proveniente de fatores incontroláveis que produzem uma variação nas repostas ao realizar os ensaios sob condições preestabelecidas (BUTTON, 2001). CRUZ et al. (1997) definem que os erros podem ser classificados em dois grupos, conforme segue:

- **erros sistemáticos:** são causados por fontes identificáveis. Esse tipo de erro faz com que os resultados experimentais estejam acima ou abaixo do valor real, influenciando a exatidão (*accuracy*) da medida. Essa flutuação pode ser causada pelo instrumento utilizado para controlar o experimento (ex. relógio, micrômetro, régua, etc.), método de observação, efeitos ambientais ou pelas simplificações do modelo teórico (ex. eliminar um fator importante para o sistema).

- **erros aleatórios:** são as flutuações que ocorrem de uma repetição para outra, porém, todos os possíveis resultados estão dentro de um intervalo de valores. Esse tipo de erro afeta a precisão (*precision*) das medidas. Segundo os autores nem sempre podem ser identificadas as fontes que causam o erro aleatório. Entretanto, esse tipo de “...erro no experimento pode ser tratado quantitativamente através de métodos estatísticos, de modo que seus efeitos na grandeza física medida podem ser, em geral, determinados”.

O uso dos gráficos de probabilidade normal é baseado no fato de que os efeitos principais ou de interação que são desprezíveis se distribuem segundo uma distribuição normal centrada em zero e com variância  $\sigma^2$ . Ou seja esses efeitos tendem a se concentrar ao longo de uma reta normal no gráfico. No entanto, se os pontos marcados no gráfico parecem desviar-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 pela equipe que realiza os experimentos industriais (LEVINE et al., 1998).

DEVOR et al. (1992) recomendam que para garantir a aplicação efetiva desse método, os experimentos fatoriais  $2^k$  devem ser realizados com pelo menos quatro fatores. Os autores citam que com um número menor de parâmetros se torna difícil decidir qual das estimativas pertencem a uma distribuição com média igual a zero.

As principais vantagens da técnica fatorial  $2^k$  é que através da análise dos experimentos pode-se indicar as principais tendências e determinar uma direção promissora para as experimentações subsequentes (OLIVEIRA, 1999; MONTGOMERY, 1991). Ainda, os autores ressaltam que com esse tipo de experimento também é possível quantificar o erro experimental.

As limitações atribuídas à técnica de fatorial  $2^k$  são apresentadas a seguir (OLIVEIRA 1999, MONTGOMERY 1991; ABRAHAM et al., 1999).

- com esse tipo de técnica de planejamento de experimento não é possível obter informações dos fatores em níveis intermediários;
- em alguns experimentos não é possível realizar replicas, porque na maioria das vezes os custos de experimentação são elevados, com isso os erros experimentais não podem ser estimados (ANDERSON, 1957);
- não é suficiente avaliar os efeitos significativos apenas sob o ponto de vista estatístico, mas torna-se necessário avaliá-los também em termos práticos para as empresas;
- torna-se inviável utilizar a técnica nas empresas quando existe um número grande de fatores;
- ao utilizar essa técnica existe o risco de construir e planejar experimentos super dimensionados, uma vez que, são considerados vários fatores para realizar os testes.

Uma das soluções encontradas para as limitações apresentadas anteriormente, é construir e planejar experimentos industriais utilizando-se a técnica de confundimento (do inglês *factorial experiments with design confounded*) ou as técnicas de experimentos fatoriais fracionados  $2^{k-p}$ . A técnica de confundimento, é uma técnica de planejamento utilizada para acomodar um experimento fatorial completo em blocos, onde o tamanho do bloco é menor que o número de tratamentos de uma replica (MONTGOMERY, 1991; COCHRAN & COX, 1957). O planejamento experimental com a técnica de fatorial fracionado  $2^{k-p}$  será abordado com mais detalhes nas próximas seções.

### 2.3.3 Análise de variância dos efeitos do experimento fatorial $2^k$

As técnicas estatísticas de experimentos são utilizadas, principalmente, para analisar, interpretar e apresentar as informações de experimentos planejados. Ainda, são ferramentas que ajudam a melhorar o desempenho industrial dos produtos e processos de fabricação (BOWER, 1997). O princípio básico das técnicas é usar os conceitos matemáticos de estatística e as informações obtidas dos experimentos realizados com os produtos ou os processos de fabricação. Com os dados analisados matematicamente e com os testes planejados corretamente é possível rejeitar ou aceitar as hipóteses formuladas pela equipe responsável por conduzir o experimento industrial. BARKER (1985) denomina esse processo de inferência estatística.

Antes de descrever as técnicas estatísticas é importante considerar alguns pontos (MONTGOMERY, 1991):

- geralmente as pessoas das empresas conhecem os problemas dos produtos e dos processos industriais, e sabem do relacionamento que existe entre os parâmetros de controle e as respostas. Esse tipo de conhecimento contribui na fase inicial do processo experimental, com a formulação das hipóteses, e nas conclusões finais do processo, com a análise estatística;



- recomenda-se que a equipe responsável pelo experimento não deve usar técnicas estatísticas complexas no início dos testes;
- os funcionários das empresas devem avaliar se a diferença estatística entre os resultados dos experimentos tem significado prático;
- as técnicas estatísticas demonstram que as diferenças entre as médias dos experimentos são grandes ou não, mas não diz porque essas diferenças ocorrem;
- usualmente os experimentos são iterativos, com isso deve-se considerar que os primeiros teste na maioria das vezes são realizados para refinar as informações técnicas dos produtos ou dos processos de fabricação.

LEVINE et al. (1998), DEVOR et al. (1992) e MONTGOMERY (1991) propõem uma metodologia ou uma série de passos que podem ser utilizados para conduzir o teste de hipótese dos experimentos. Alguns conceitos e pontos importantes desse procedimento são abordados a seguir:

**1. Formulação das hipóteses:** ao realizar um experimento industrial a equipe deve partir de duas hipóteses sobre determinado(s) parâmetro(s). A primeira é a hipótese nula ( $H_0$ ). Essa hipótese parte do princípio que não existe nenhuma diferença significativa entre os fatores analisados de uma população e será sempre a hipótese testada no experimento. A segunda é a hipótese alternativa ( $H_1$ ) e parte do princípio que será verdadeira caso a hipótese nula seja considerada falsa.

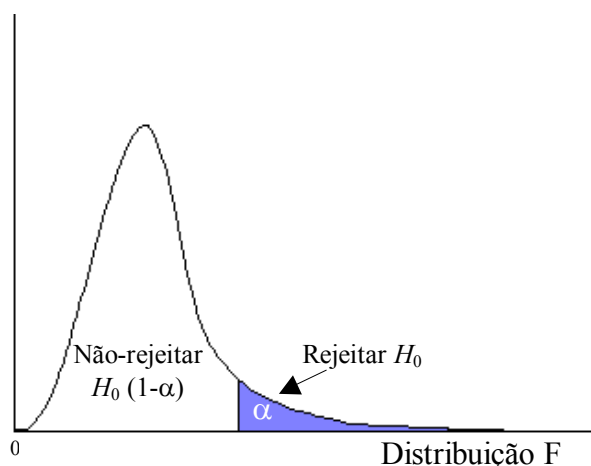
**2. Determinar o valor crítico da estatística de teste:** ao desenvolver as hipóteses dos experimentos industriais é necessário que seja calculada uma estatística específica, com base em um determinado resultado da amostra. Tais valores podem ser determinados com o auxílio de softwares estatísticos. LEVINE et al. (1998) e MONTGOMERY (1991) apresentam várias distribuições estatística ( $t$ -student, F-Fisher, Z-standard, entre outras) que podem ser usadas para se determinar a probabilidade de uma hipótese nula ser verdadeira.

É importante ressaltar que para os experimentos industriais realizados nesta dissertação, será utilizada a distribuição F, portanto, alguns pontos importantes desta ferramenta estatística serão abordados posteriormente. Maiores informações sobre as outras distribuições podem ser obtidas na literatura que trata de planejamento e análise de experimentos (LEVINE et al., 1998; DEVOR et al., 1992; MONTGOMERY, 1991).

3. Riscos na tomada de decisão por meio da metodologia do teste de hipótese: ao utilizar uma estatística para se concluir sobre o resultado de experimentos industriais podem ser cometidos dois tipos de erros: O primeiro erro (erro tipo I) ocorre se a hipótese nula for rejeita quando ela é verdadeira e o erro tipo II ocorre quando a hipótese nula não é rejeitada sendo falsa.

No entanto, ao realizar os experimentos industriais a equipe pode estimar alguns parâmetros que reduzem a probabilidade de errar nas decisões ou chegar a uma conclusão incorreta sobre os fatores que influenciam o sistema investigado, conforme segue (LEVINE et al., 1998):

- **Nível de significância.** A probabilidade de se cometer o erro tipo I é identificada como 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. Os autores da literatura de planejamento e análise de experimentos recomendam que a equipe deve selecionar os níveis de  $\alpha$  em 0,1 ou menos. Ainda, uma vez selecionado o valor de  $\alpha$  é possível determinar o tamanho da região de rejeição da hipótese nula do experimento. Com isso, os valores críticos que dividem as regiões de rejeição e não-rejeição podem ser determinados, conforme apresentado pela Figura 2.5, para a estatística F. Os valores críticos dessa ferramenta são apresentados por LEVINE et al. (1998); DEVOR et al. (1992) e MONTGOMERY (1991).



**FIGURA 2.5** - REGIÕES DE REJEIÇÃO E NÃO-REJEIÇÃO PARA UMA DISTRIBUIÇÃO F  
Fonte: LEVINE et al. (1998) e DEVOR et al. (1992).

- **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 esse 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 contida dentro de um intervalo. MONTGOMERY (1991), destaca que com esse procedimento se garante um valor pequeno para a probabilidade do erro tipo II. Em termos de metodologia de teste “...esse coeficiente representa a probabilidade de se concluir que o resultado de um fator que está sendo testado para a hipótese nula seja plausível...” (LEVINE et al., 1992).

Considerando-se esses fatores, a seguir é descrita a técnica estatística de Análise de Variância, também conhecida como ANOVA (*Analysis of variance*). As definições são baseadas nas referências bibliográficas DEVOR et al. (1992) e MONTGOMERY (1991). O texto também foi construído com base nas apostilas preparadas por BUTTON (2001); CARPINETTI (2001) e CRUZ et al. (1997). É importante, destacar que outras técnicas podem ser utilizadas para analisar os experimentos industriais (OLIVEIRA, 1999; WERKEMA & AGUIAR, 1996; MONTGOMERY, 1991).

A análise de variância é utilizada para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as

hipóteses investigadas com os experimentos industriais. O objetivo dessa técnica é analisar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que realmente produzem efeitos (principais e de interação) significativos nas respostas de um sistema.

Para ilustrar o procedimento considere-se o experimento fatorial com dois fatores, cada um deles com apenas dois níveis. O modelo matemático que define a variação da resposta em função dos fatores de controle é dado pela eq. 2.1. Com a análise de variância procura-se identificar se alguns dos coeficientes desse modelo são reflexos do erro experimental ou se realmente são efeitos significativos.

Assim, a contribuição de qualquer parâmetro ( $E_i$ ) no modelo matemático é dado pela soma de quadrados ( $SS_{E_i}$ ), conforme eq. (2.4).

$$SS_{E_i} = \frac{(E_i)^2}{4.n} \quad (2.4)$$

sendo que  $n$  é o número de observações realizadas.

Para determinar a soma quadrática das interações, procede-se conforme a eq. (2.5).

$$SS_{E_{12}} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{y_{ij}^2}{2n} - \frac{T^2}{4n} - SS_{E_1} - SS_{E_2} \quad (2.5)$$

sendo que  $T$  é a soma total das observações e  $y_{ij}$  representa as respostas experimentais.

A somatória dos quadrados das diferenças é representada pela eq. (2.6).

$$SS_D = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{T^2}{4n} \quad (2.6)$$

sendo que  $T$  é a soma total das observações e  $y_{ij}$  representa as respostas experimentais.

A soma quadrática dos erros é dada pela eq. (2.7).

$$SS_R = SS_D - SS_{E1} - SS_{E2} - SS_{E12} \quad (2.7)$$

Os resultados da ANOVA são geralmente apresentados em um quadro ou tabela, conforme o Quadro 2.3. Tais resultados representam a análise do experimento fatorial com dois fatores, cada um deles com dois níveis. As colunas nesse quadro incluem as fontes de variação, a soma dos quadrados ( $SS_{E1}$ ,  $SS_{E2}$ , ...,  $SS_D$ ), os graus de liberdade ( $g.l$  é a propriedade pela qual qualquer das  $(n - 1)$  observações de uma amostra completamente determinam a outra observação), os quadrados médios (MS), ou a variância dos parâmetros, e a estatística do teste  $F_0$ .

**QUADRO 2.3** - ANOVA DE UM EXPERIMENTO FATORIAL COM DOIS FATORES  
Fonte: MONTGOMERY (1991).

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	<i>g.l.</i>	Quadrado Médio	$F_0$
$E_1$	$SS_{E1}$	$a-1$	$MS_{E1} = SS_{E1}/a-1$	$MS_{E1}/ MS_R$
$E_2$	$SS_{E2}$	$b-1$	$MS_{E2} = SS_{E2}/b-1$	$MS_{E2}/ MS_R$
Interação $E_{12}$	$SS_{E12}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{E12} = SS_{E12}/(a-1)(b-1)$	$MS_{E12}/ MS_R$
Erro	$SS_R$	$abn(n - 1)$	$MS_R = SS_R/ab(n-1)$	
Total	$SS_D$	$abn - 1$		

O método de análise de variância apresentado anteriormente refere-se ao caso de um planejamento fatorial, com dois fatores, cada um deles com dois níveis. Esse processo pode ser generalizado para o experimento fatorial  $2^k$ . O modelo estatístico (eq. (2.2)) para o experimento fatorial  $2^k$  inclui  $k$  efeitos principais,  $\binom{k}{2}$  interações de dois fatores,  $\binom{k}{3}$  interações de três fatores, ..., e uma interação de  $k$  fatores. Uma vez estimados os efeitos principais e de interação, a soma de quadrados para qualquer um dos efeitos será conforme a eq. (2.8). No Quadro 2.4 é representado o quadro geral de ANOVA para um experimento fatorial  $2^k$  (MONTGOMERY, 1991).

$$SS_{E_{12, \dots, k}} = \frac{(E_{12 \dots k})^2}{n2^k} \tag{2.8}$$

sendo que  $n$  é o número de observações realizadas e  $k$  o número de fatores.

**QUADRO 2.4 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UM EXPERIMENTO  $2^k$**   
 Fonte: MONTGOMERY (1991).

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade
Efeitos Principais		
$E_1$	$SS_{E_1}$	1
$E_2$	$SS_{E_2}$	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$E_k$	$SS_{E_k}$	1
$\binom{k}{2}$ Interação a dois Fatores		
$E_{12}$	$SS_{E_{12}}$	1
$E_{13}$	$SS_{E_{13}}$	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$E_{jk}$	$SS_{E_{jk}}$	1
$\binom{k}{3}$ Interação a três Fatores		
$E_{123}$	$SS_{E_{123}}$	1
$E_{124}$	$SS_{E_{124}}$	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$E_{1jk}$	$SS_{E_{ijk}}$	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\binom{k}{k}$ Fatores Interação		
$E_{123 \dots k}$	$SS_{E_{123 \dots k}}$	1
Erro	$SS_E$	$2^k (n-1)$
Total	$SS_T$	$n2^k - 1$

Segundo VIEIRA (1996), a interpretação dos resultados do quadro de ANOVA se apresenta em duas categorias, conforme segue.

- os parâmetros que possuam razão  $F_0$  maior que a estatística  $F$  crítica, são os fatores que exercem influência sobre o valor da média de resultados. A estatística  $F$ , que segue uma distribuição com  $\nu_1$  (numerador) e  $\nu_2$  (denominador) graus de liberdade, para um dado nível de significância  $\alpha$ , são retiradas das tabelas apresentadas por vários autores (LEVINE et al., 1998; DEVOR et al., 1992; MONTGOMERY, 1991).

- os fatores que possuam razão  $F_0$  menor que a  $F$  crítica não causam efeitos significativos sobre a média, portanto, a hipótese nula é verdadeira.

É importante ressaltar que o quadro ANOVA é facilmente construído com softwares estatísticos (EXCEL, MINITAB, STATISTICA). Além dessa vantagem, na maioria dos programas computacionais está incluído o valor  $p$ . Esse valor corresponde à área sob a qual a estatística  $F$  é limite da razão  $F_0$  calculada. Com esse parâmetro estatístico é possível concluir sobre as hipóteses nulas sem precisar recorrer a uma tabela de valores críticos da distribuição  $F$ . Isto é, se o valor  $p$  for menor que o nível de significância escolhido  $\alpha$ , a hipótese nula é rejeitada.

No entanto, a inferência estatística com a ANOVA é um processo que requer alguns cuidados: a equipe não pode esquecer que um efeito de interação indica que todos os fatores envolvidos (na interação) são significativos, apesar do fato de que seus efeitos principais na ANOVA possam não mostrar a significância; os fatores de ruído a priori não são completamente investigados. Nesse caso outras técnicas com um melhor desempenho podem ser utilizadas (ex. Projeto Robusto) (TAGUCHI, 1993).

#### 2.3.4 Planejamento fatorial fracionado $2^{k-p}$

Ao realizar experimentos industriais, é comum verificar a necessidade de estudar o efeito de um ou mais fatores de controle ao mesmo tempo (ABRAHAM et al., 1999). A aplicação das técnicas de planejamentos de experimentos fatoriais fracionados  $2^{k-p}$ , mostra-se como uma das soluções para esse tipo de problema. MONTGOMERY (1991) ressalta que, com essas técnicas, é possível analisar os efeitos sobre uma resposta de interesse, de  $k$  fatores com dois níveis cada um, em  $2^{k-p}$  combinações de testes, realizando-se apenas uma parte (metade do experimento quando  $p$  é igual a um, ou um quarto do experimento quando  $p$  é igual a dois), do experimento sem comprometer significativamente a precisão das conclusões decorrentes da análise de resultados. Simultaneamente, os custos e o tempo de duração dos ensaios são significativamente reduzidos.

Segundo ABRAHAM et al. (1999), quando são utilizadas as técnicas de experimentos fatoriais  $2^{k-p}$ , a equipe responsável assume que os efeitos de interação de ordem superior são desprezíveis. Nesse sentido, BOX & LIU (1999) descrevem um estudo sobre as técnicas fatoriais fracionados  $2^{k-p}$  e ressaltam a eficiência de obter informações confiáveis com esses métodos. MONTGOMERY (1991) resalta três idéias importantes que justificam a utilização das técnicas de experimentos fatoriais fracionados. A primeira delas é a dispersão dos efeitos. Isto é, quando existem vários fatores de controle, torna-se provável que o processo seja influenciado apenas por alguns efeitos principais e de interação de ordem inferior. A segunda característica é denominada de propriedade de projeção. Neste caso, os experimentos fatoriais fracionados podem ser planejados em matrizes maiores, que podem ser construídas a partir de um subconjunto de fatores significativos. A terceira característica desse tipo de técnica é a experimentação seqüencial. Ocorre quando é possível combinar as corridas de dois ou mais experimentos fatoriais fracionados.

A seguir, utilizando-se como base os três princípios abordados anteriormente, são descritos outros aspectos que devem ser considerados ao se construir experimentos industriais com essas técnicas (CARPINETTI, 2000; OLIVEIRA, 1999; DEVOR et al., (1992), MONTGOMERY, 1991; BOX & BISGAARD, 1987):

Considere-se um estudo com três fatores de controle (1, 2, e 3), com dois níveis cada um. A equipe responsável por conduzir o experimento determinou que é inviável economicamente realizar as oito combinações ( $2^3 = 8$ ) da matriz. Porém, é possível realizar um experimento com quatro (metade) observações ( $2^3/2 = 2^{3-1} = 4$ ). Esse exemplo é apresentado por MONTGOMERY (1991) e DEVOR et al. (1992).

No Quadro 2.5, aparecem todas as combinações possíveis do experimento fatorial completo  $2^3$ . As colunas 12, 13, 23 e 123 foram estimadas pela multiplicação das colunas que contem os fatores 1, 2 e 3. Por conveniência as combinações (linhas da matriz) foram separadas pelos sinais de positivo e negativo da coluna de interação de maior ordem, ou seja pela interação 123. Essa coluna da matriz é denominada de relação definidora do experimento. Nesse tipo de experimento a equipe responsável pode optar pela execução das combinações referentes à parte positiva (teste número 1, 2, 3 e 4), o que é mais usual, ou executar a outra parte (corridas 5, 6,



7 e 8). No primeiro caso a combinação dos ensaios é representada por  $I = 123$ . Se for selecionada a parte negativa, deve-se lembrar que a relação definidora do experimento será  $I = -123$ .

**QUADRO 2.5** - EXPERIMENTO FATORIAL  $2^3$   
Fonte:DEVOR et al. (1992).

Combinações tratamento	Efeito fatorial								Y <sub>i</sub>
	I	1	2	3	12	13	23	123	
1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y <sub>1</sub>
2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y <sub>2</sub>
3	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y <sub>3</sub>
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y <sub>4</sub>
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y <sub>5</sub>
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y <sub>6</sub>
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y <sub>7</sub>
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y <sub>8</sub>

A seguir, com objetivo de ilustrar o processo de planejamento experimental com a técnica fatorial fracionado será utilizada a parte positiva do experimento, apresentado no Quadro 2.5. Nessa matriz são identificadas as seguintes combinações lineares para estimar os efeitos principais dos fatores 1, 2 e 3, conforme segue.

$$l_1 = \frac{1}{2} (+1 - 2 - 3 + 4)$$

$$l_2 = \frac{1}{2} (-1 + 2 - 3 + 4)$$

$$l_3 = \frac{1}{2} (-1 - 2 + 3 + 4)$$

e para os efeitos de interação 12, 13 e 23 se obtém:

$$l_{12} = \frac{1}{2} (-1 - 2 + 3 + 4)$$

$$l_{13} = \frac{1}{2} (-1 + 2 - 3 + 4)$$

$$l_{23} = \frac{1}{2} (+1 - 2 - 3 + 4)$$

Percebe-se que algumas combinações lineares são iguais ( $l_1 = l_{23}$ ,  $l_2 = l_{13}$  e  $l_3 = l_{12}$ ). Quando isso ocorre torna-se impossível identificar claramente quais são os efeitos principais de cada fator porque estão misturados com os efeitos produzidos pela combinação de dois fatores. Nesse caso, MONTGOMERY (1991) e DEVOR et

al. (1992) afirmam que na realidade está sendo determinado o efeito das combinações de 1 + 23, 2 + 13 e 3 + 12, e esta propriedade é conhecida como efeito de “confundimento”.

A estrutura de confundimento de um efeito principal ou de interação em um experimento pode se determinar por meio da multiplicação do efeito com a relação definidora. Por exemplo, a estrutura de confundimento do efeito principal pode ser obtida conforme segue:

Para o efeito principal 1;

$$(1) I = (1)123 = 23$$

O mesmo procedimento é utilizado para estimar  $2 = 13$  e  $3 = 12$ . Nota-se que não existe confundimento entre os efeitos principais, porém essas informações estão confundidas com os efeitos das interações entre dois fatores.

Sendo assim, um aspecto importante que deve ser considerado nos experimentos fatoriais fracionados é a resolução que está sendo utilizada. Segundo MONTGOMERY (1991), a resolução de um planejamento fatorial fracionado está relacionada ao padrão de confundimento entre os efeitos dos fatores. O autor recomenda que nos experimentos deve-se utilizar a maior resolução possível, porque com isso é possível desprezar os efeitos de interação de mais alta ordem. A seguir são apresentadas as definições de resolução III, IV e V, que são consideradas como as mais importantes e utilizadas ao se construir os experimentos industriais (MONTGOMERY, 1991; STEINBERG & HUNTER, 1984).

- Resolução III - isto significa que ao menos alguns efeitos principais são confundidos com efeitos de interação de dois fatores;
- Resolução IV - se um planejamento é de resolução IV isto significa que ao menos alguns efeitos principais serão confundidos com efeitos de interação de três fatores, e ao menos alguns efeitos de interação de dois fatores são confundidos com outros efeitos de interação de dois fatores;

- Resolução V - se um planejamento é de Resolução V, ao menos alguns dos efeitos principais são confundidos com efeitos de interação de quatro fatores, e os efeitos de interação de dois fatores são confundidos com os efeitos de interação de três fatores.

Em alguns casos dependendo do número de fatores que são investigados, uma fração menor de combinações é necessária para realizar os experimentos fatoriais. Por exemplo a equipe pode apenas realizar um quarto ( $1/4$ ) do experimento fatorial completo. Este tipo de experimento é conhecido como experimento fatorial fracionado  $2^{k-2}$ . 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 é a necessidade de determinar duas colunas geradoras para construir a matriz.

Conforme o número de fatores outras frações podem ser utilizadas. Na literatura que estuda as técnicas de planejamento e análise de experimentos industriais estão disponíveis o número de combinações e as estruturas de confundimento para esse tipo de experimento (WU & CHEN, 1992; MONTGOMERY, 1991). Ainda, softwares estatísticos (MINITAB, STATISTICA) podem ser usados para construir esse tipo de matriz.

Ao mesmo tempo, ressalta-se que a análise estatística e descritiva (gráficos lineares e de probabilidade normal) dos efeitos principais e de interação dos fatores segue os mesmos princípios apresentados anteriormente para um experimento fatorial  $2^k$ . Outras informações podem ser consultadas na literatura que trata de projetos de experimentos (MONTGOMERY, 1991; DEVOR et al., 1992).

## 2.4 Metodologia de superfície de resposta

Segundo TAY & BUTLER (1999) e MYERS et al. (1989), a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR ou RSM do inglês *Response Surface Methodology*), é um conjunto de técnicas de planejamento e análise de experimentos usadas na

modelagem matemática de respostas. Esse método foi desenvolvido por George Box, da Universidade de Princeton - Estados Unidos, com a colaboração de outros autores, na década de 1950. O estudo foi motivado porque os pesquisadores sentiram a necessidade de utilizar um procedimento para determinar as condições ótimas (ou níveis ótimos) dos fatores de controle que interferem na resposta de um sistema (MYERS et al., 1989).

No entanto, a literatura que pesquisa o tema relata que só a partir da década de 1980, a MSR passou a ser aplicada pelas empresas, principalmente a indústria japonesa e americana. Nas fábricas o método pode contribuir na melhoria da qualidade dos produtos ou processos de fabricação, a aumentar a produtividade e a reduzir o tempo de desenvolvimento de produtos, entre outros fatores (GUEDES, 1996). O sucesso alcançado pelas indústrias motivou outros setores a conduzir (planejar) e analisar estatisticamente os experimentos. Entre as áreas que mais utilizam os conceitos pode-se citar: Física, Engenharia, Indústria de alimentos, Ciências sociais (economia, pesquisa operacional e sistemas de simulação) e Biologia (por exemplo, os conceitos podem ser utilizados para determinar o relacionamento que existe entre a estrutura química de um componente e sua reação biológica, assim como, para realizar estudos sobre os efeitos da poluição industrial no meio ambiente) (ELSAYED & CHEN, 1993; MYERS et al., 1989).

Na maioria dos estudos publicados observa-se que os projetos experimentais desenvolvidos com o método envolvem a modelagem matemática de apenas uma resposta (*single-response analysis*) (REDDY et al., 1998). Porém, é importante ressaltar que a MSR é um procedimento que pode ser aplicado na modelagem de problemas em que são observadas várias características de qualidade. Esse método também é conhecido como otimização de multi-respostas (*multiple-response experimental design*) (MYERS & MONTGOMERY, 1995; KHURI & CORNEL, 1987). Destaca-se que um fator importante que facilita o uso da MSR com multi-resposta é o avanço tecnológico dos softwares estatísticos. Com essa evolução também foi possível reduzir os erros nas análises estatísticas dos problemas estudados (TAY & BUTLER, 1999).

Segundo BOX & HUNTER (1957) as principais razões para estudar os problemas de um sistema com a MSR são:

- determinar quais são as condições dos fatores ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) que determinam o melhor valor para a resposta  $y_i$ ;
- necessidade de se conhecer as características da função resposta, que se aproxima das condições reais de operação dos sistemas. Nas empresas, essas informações podem ser utilizadas para mudar as condições de operação dos processos de fabricação sem aumentar os custos de produção e melhorar o sistema de controle do processo;
- interesse em identificar o relacionamento que existe entre os parâmetros (que podem ser representados por variáveis quantitativas tipo tempo, velocidade, pressão, temperatura, etc.) e as respostas.

Segundo COCHRAN & COX (1957) a função matemática que descreve a *superfície de resposta* é dada pela eq. (2.9).

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (2.9)$$

sendo que  $x_1, x_2, \dots, x_k$  são os fatores experimentais e  $\varepsilon$  é o resíduo ou erro experimental, ou seja, é a dispersão dos resultados em torno da função matemática aproximada aos pontos.

Na maioria dos problemas analisados com a MSR é desconhecida a função matemática que define o relacionamento entre a resposta e os fatores experimentais. No entanto, na literatura de projetos experimentais algumas funções de resposta (também conhecidas como *função objetivo*) são descritas e utilizadas por vários autores (RIBEIRO et al., 2000; REDDY et al., 1998; GUEDES, 1996; ELSAYED & CHEN, 1993 e TAGUCHI, 1993). Os aspectos mais importantes que são considerados pelos modelos no procedimento de otimização são: a média e a variância das repetições de cada corrida experimental.

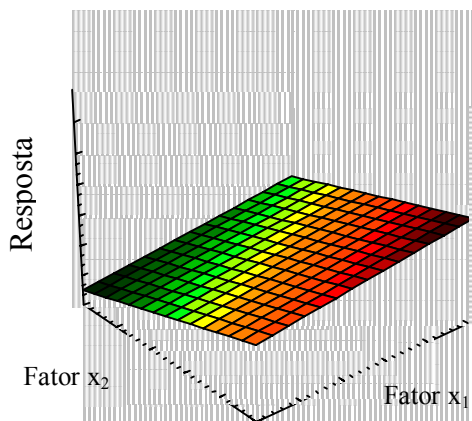
A seguir é descrito um dos métodos de otimização que podem ser utilizados para se aproximar da superfície de resposta (MYERS & MONTGOMERY, 1995;

KHURI & CORNELL, 1987).

No procedimento de otimização, um primeiro passo é identificar uma função matemática que modele a variação das respostas em função da variação dos fatores investigados. Segundo MYERS et al. (1989), os polinômios algébricos são amplamente utilizados para se aproximar da região de resposta. GUEDES (1996), afirma que o grau de aproximação depende essencialmente do grau do polinômio (definido pelo produto de  $k$  fatores) e da faixa do intervalo considerado. Geralmente, a primeira função que é utilizada para se aproximar ao conjunto de resultados são os polinômios de primeira ordem, representado pela eq. (2.10). Nesse caso, procura-se verificar se a variação da resposta em função dos fatores é bem modelada por uma superfície plana, conforme a Figura 2.6

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon \quad (2.10)$$

sendo que  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ , representam os coeficientes do polinômio;  $x_1, x_2, \dots, x_k$  são os fatores experimentais e  $\varepsilon$  é o erro experimental.



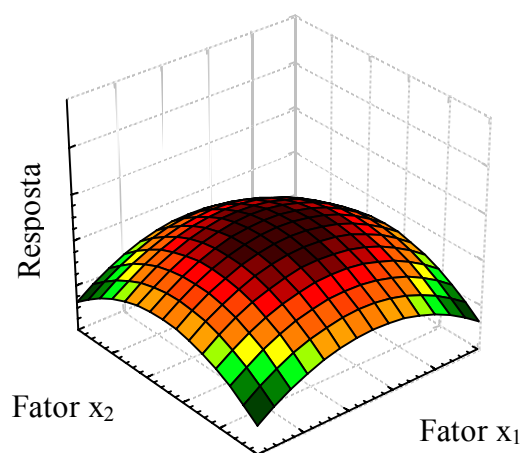
**FIGURA 2.6 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA TRIDIMENSIONAL PLANA**

MONTGOMERY (1991) ressalta que se a variação da resposta em função dos fatores é melhor modelada por uma superfície não plana, ou seja, o teste estatístico aponta que o modelo linear não satisfaz as condições de operação do sistema porque existe uma curvatura na superfície de resposta, conforme a Figura 2.7, então a função a ser aproximada ao conjunto de resultados é um

polinômio de mais alta ordem, como um modelo de segunda ordem, dado pela eq. (2.11). Segundo COCHRAN & COX (1957), esse modelo é o mais utilizado para ajustar a superfície de resposta.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.11)$$

sendo que  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ , representam os coeficientes do polinômio;  $x_i, x_j, \dots, x_k$  são os fatores experimentais e  $\varepsilon$  é o erro experimental.



**FIGURA 2.7** - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA TRIDIMENSIONAL NÃO PLANA

Outro procedimento que pode ser utilizado para ajustar a função de resposta é por meio de aproximações por funções SPLINES, descrito por SCHUMAKER<sup>1</sup> *apud* GUEDES (1996). Neste método o intervalo original de aproximação é dividido em subintervalos, para que a distância entre a função ajustada e a função que representa o sistema seja mínima. No presente projeto, os detalhes desta metodologia não serão apresentados, porque a modelagem das respostas experimentais será realizada com as aproximações por polinômios, descritos anteriormente.

Em muitas aplicações da MSR o maior problema enfrentado pelas pessoas é na hora de selecionar o planejamento experimental. A seguir são apresentadas algumas características e propriedades dos experimentos fatoriais  $2^k$  que podem ser

<sup>1</sup> SHUMAKER, L.L. (1968). Approximation by splines. In: *Proceedings of an advanced seminar conducted by the mathematics research center, NY*. University of Wisconsin. Academic Press.

utilizados na MSR. A classificação das técnicas de experimentos será realizada conforme o grau do polinômio que é utilizado para ajustar a resposta.

#### 2.4.1 Experimento fatorial $2^k$ para ajustar a superfície de resposta

MYERS & MONTGOMERY (1995) e BOX & HUNTER (1957), ressaltam que antes de realizar os experimentos é conveniente que os fatores de controle sejam codificados no intervalo (-1, 1). Uma forma de fazer a transformação é dada pela eq. (2.12). Essa codificação é utilizada porque facilita a construção dos planejamentos experimentais, remove as unidades de medida dos fatores de controle e a distância ao longo dos eixos.

$$x_i = \frac{(\xi_i - n_c)}{\Delta x_i} \quad (2.12)$$

sendo que  $\xi_i$  representa o nível da variável natural do processo de fabricação,  $n_c$  é o ponto central utilizado no experimento e  $\Delta x_i$  é o valor de escala ou o incremento na variável independente.

O planejamento experimental deve determinar os coeficientes de regressão dos polinômios com variância mínima (BOX & HUNTER, 1957). GUEDES (1996) afirma que se os fatores experimentais de uma matriz X são funcionalmente independentes então, a anterior exigência será satisfeita ao selecionar um planejamento que produza a matriz  $X'X$  diagonal. Nesse caso, os planejamentos ortogonais (uma matriz é dita ortogonal quando os elementos fora da diagonal da matriz  $X'X$  são todos zero. Isto implica que a soma do produto da matriz X também é zero) e em particular os experimentos fatoriais  $2^k$  e algumas de suas classificações satisfazem esta condição.

Quando é realizado um experimento fatorial  $2^k$ , dificilmente o experimentador sabe se a resposta de interesse varia de forma linear ou não linear em função dos fatores, pois apenas existem dois níveis para cada parâmetro. A seguir, algumas técnicas de planejamento que ajudam a resolver esse problema são apresentadas (GUEDES, 1996; MYERS & MONTGOMERY, 1995;

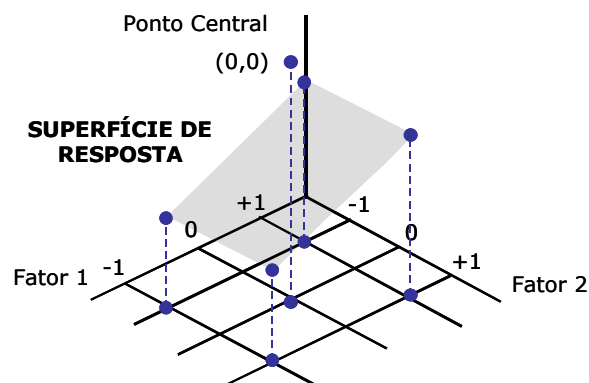


MONTGOMERY, 1991; KHURI & CORNELL, 1987).

- **Planejamento para o ajuste de um modelo de primeira ordem:** esse tipo de experimento é utilizado quando se deseja aproximar rapidamente da superfície de resposta.

A classe de planejamento que satisfaz as condições (principalmente a ortogonalidade e a variação mínima dos coeficientes de regressão) apresentadas anteriormente, é o experimento fatorial  $2^k$ , com pontos centrais ( $n_c$ ). Esse método consiste em adicionar um ponto de experimentação no nível  $x_0$  (0, 0), intermediário aos níveis (-1, +1), para os fatores  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ). Neste caso, assume-se que os  $k$  fatores sejam quantitativos. Segundo MONTGOMERY (1991), os pontos centrais são utilizados para conservar a linearidade dos efeitos provocados pelos fatores no experimento, assim como, para se estimar os erros experimentais, sem influenciar os efeitos produzidos pelos fatores nas respostas.

Para ilustrar a técnica, considere-se um experimento  $2^2$ . Neste caso, as combinações lineares dos níveis dos fatores seriam (-1, -1), (-1, +1), (+1, -1) e (+1, +1), e ainda existem  $n_c$  observações nos níveis (0, 0), como ilustrado pela Figura 2.8.



**FIGURA 2.8** - PLANEJAMENTO FATORIAL  $2^2$ , COM PONTOS CENTRAIS  
Fonte: MONTGOMERY (1991).

A ferramenta estatística que é utilizada para testar se existe ou não curvatura na região central será descrita na próxima seção. Se, ao realizar a análise de variância (ANOVA), verifica-se que o modelo de primeira ordem não pode ser utilizado para

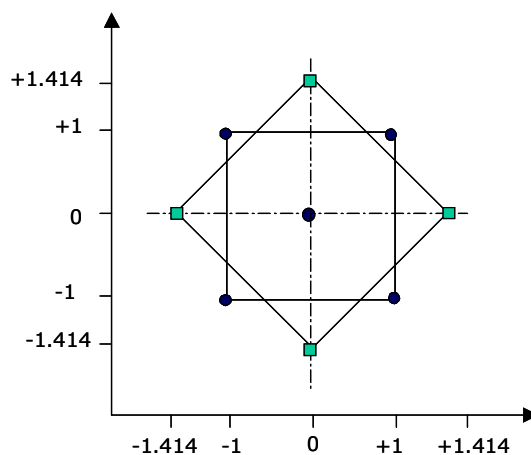
ajustar a superfície de resposta, a equipe deve partir para a construção de um modelo de segunda ordem. Em alguns casos novos experimentos devem ser planejados conforme será descrito a seguir.

- **Planejamento para o ajuste de um modelo de segunda ordem:** Um planejamento experimental para o modelo de segunda ordem devem conter pelo menos três (3) níveis para cada fator (MONTGOMERY, 1991). Neste caso, a série de experimentos que podem ser utilizados no planejamento da superfície de resposta de segunda ordem são os planejamentos rotáveis (*rotatable second design*) (BOX & HUNTER, 1957). Um experimento é rotável se a variância da resposta estimada, para algum ponto  $x_i$ , é em função da distância do ponto ao centro e não em função da direção (MONTGOMERY, 1991). GUEDES (1996) afirma que essa característica define que o contorno de variância da resposta estimada é formado por círculos concêntricos.

A classe de planejamento rotável mais usado para ajustar o modelo de segunda ordem é o planejamento composto central. Este planejamento consiste de um  $2^k$  fatorial ou fatorial fracionado  $2^{k-p}$  mais  $2k$  pontos axiais e  $n_c$  pontos centrais (BOX & HUNTER, 1957). Os  $2k$  pontos axiais, são localizados em  $(\pm\alpha_1, 0, 0, \dots, 0)$ ,  $(0, \pm\alpha_1, 0, \dots, 0)$ ,  $(0, 0, \pm\alpha_1, \dots, 0)$ , ...,  $(0, 0, 0, \dots, \pm\alpha_1)$ , sendo que  $\alpha_1$  é dado pela eq. (2.13).

$$\alpha_1 = (2^k)^{1/4} \quad (2.13)$$

O ponto axial no planejamento é utilizado para garantir que o experimento seja rotável. Segundo MONTGOMERY (1991) e BOX & DRAPER (1987), com esse ponto é possível estimar os coeficientes da superfície em todas as direções possíveis. Ainda, o valor de  $\alpha_1$  depende do número de pontos na porção fatorial do planejamento. Por exemplo, a configuração de um experimento fatorial composto central com dois fatores pode ser visualizada pela Figura 2.9, sendo que o quadrado com círculos sólidos nas arestas representa o fatorial  $2^2$ , o círculo no centro representa o ponto central  $n_c (0, 0), (0, 0), \dots, (0, 0)$ , e o losango com quadrados nas arestas representa os pontos axiais do experimento fatorial composto central.



**FIGURA 2.9** - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL  
Fonte: Adaptado de MONTGOMERY (1991).

Nota-se que outra propriedade do planejamento composto central é que pode ser controlado pela escolha do número de pontos centrais  $n_c$ , ou seja, com um número apropriado de pontos centrais o planejamento é ortogonal e pode ser de precisão uniforme. Nesse caso, a variância da resposta estimada na origem é igual para as distâncias unitárias desde a origem (GUEDES, 1996).

Outro tipo de planejamento que pode ser utilizado para conduzir os experimentos são os arranjos ortogonais propostos pelo Método Taguchi. Tais matrizes são descritas por TON et al. (1997); ELSAYED & CHEN (1993); REDDY et al. (1998); MYERS et al. (1989) e STEINBERG & HUNTER (1984). Ainda, na literatura observa-se que existem outros algoritmos que podem ser utilizados para construir as matrizes dos experimentos utilizados na otimização de respostas, conforme descritos por YONCHEV (1988) e STEINBERG & HUNTER (1984).

#### 2.4.2 Análise de variância de superfície de resposta: experimento $2^k$

HILL & HUNTER (1966) propõem um procedimento para realizar a análise estatística de superfície de resposta. Essa estratégia é dividida em quatro passos, conforme segue.

1. **Executar com bom desempenho os experimentos.** Esta etapa depende,

principalmente, da técnica de planejamento utilizada para conduzir os experimentos, conforme descrito anteriormente.

## 2. Determinar os coeficientes do modelo matemático de ajustagem.

Para estimar os coeficientes ( $\beta$ ) dos polinômios de primeira e segunda ordem, vários autores apresentam o método de mínimos quadrados, conforme descrito pela eq. (2.14). Outras informações desse método são descritas no Anexo A.

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.14)$$

sendo que  $\beta$  é a matriz com os coeficientes,  $X$  é a matriz com os parâmetros experimentais codificados e  $y$  é a resposta experimental.

## 3. Checar se o modelo matemático é adequado para ajustar a superfície de resposta.

Na análise de superfície de resposta podem ser utilizadas diversas ferramentas estatísticas. As mais comuns são os gráficos de superfície de resposta e a técnica de análise de variância (ANOVA). Os gráficos podem ser utilizados para estudar visualmente o relacionamento que existe entre os fatores e as respostas. Porém, HILL & HUNTER (1966) ressaltam que essas ferramentas não são exatas para representar o relacionamento. A ANOVA é utilizada para verificar se a variação dos coeficientes ( $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ) do modelo matemático interfere significativamente na modelagem da superfície de resposta.

Segundo MONTGOMERY (1991), a linearidade do modelo matemático pode ser verificada ao estimar a diferença entre a média das respostas para os pontos fatoriais do experimento ( $\bar{y}_f$ ), e a média dos resultados obtidos em  $n_c$  rodadas no ponto central ( $\bar{y}_c$ ). Se a diferença entre ( $\bar{y}_f - \bar{y}_c$ ) for pequena, então assume-se que o ponto central está próximo ao plano que contém as respostas do experimento fatorial (a superfície de resposta plana) e portanto não há curvatura no sistema. No entanto, se essa diferença for grande, assume-se que a superfície de resposta na região é não plana (MONTGOMERY, 1991; BOX & HUNTER, 1957).

Para testar estatisticamente se existe ou não curvatura na região central, calcula-se a soma quadrática nesse ponto, dada pela eq. (2.15).

$$SS_{\text{Curvatura}} = \frac{n_f n_c (\bar{y}_f - \bar{y}_c)}{n_f + n_c} \quad (2.15)$$

sendo que  $n_f$  é o número de resultados na parte fatorial do experimento e  $n_c$  é o número de resultados no ponto central.

Em seguida, a estatística F é determinada, conforme a eq. (2.16).

$$F_0 = \frac{SS_{\text{Curvatura}}}{\sigma^2} \quad (2.16)$$

sendo que  $\sigma^2$  é uma estimativa do erro experimental ( $SS_E$ ) calculada a partir dos resultados no ponto central ( $n_c$ ), dado pela eq. (2.17).

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{\text{Ponto central}} (y_i - \bar{y})^2}{n_c - 1} \quad (2.17)$$

sendo que  $\bar{y}$  é a média dos resultados no ponto central e  $y_i$  são as respostas do experimento fatorial.

Ainda, antes de afirmar que o modelo matemático pode ser utilizado para ajustar a superfície de resposta, é necessário realizar uma análise estatística mais completa dos coeficientes do polinômio. O objetivo é verificar se esses termos influenciam significativamente a modelagem da superfície. O processo é decompor a soma total de quadrados, dado pela eq. (2.18).

$$SS_T = SS_\beta + SS_E \quad (2.18)$$

A soma de quadrados dos coeficientes ( $SS_\beta$ ) é dada pela eq. (2.19).

$$SS_{\beta_i} = \sum_{i=1}^k \beta_i SS_{iy} \quad (2.19)$$

sendo que  $SS_{iy}$  é a soma de quadrados da  $i$ -ésima variável de experimentação, dada pela eq. (2.20).

$$SS_{iy} = \sum_{j=1}^n y_j x_{ij} - \frac{\left( \sum_{j=1}^n y_j \right) \left( \sum_{j=1}^n x_{ij} \right)}{n} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.20)$$

sendo que  $y_j$  é a resposta experimental,  $x_{ij}$  é o nível da  $i$ -ésima variável e  $n$  número de observações.

Para aceitar ou rejeitar a hipótese de curvatura ou verificar se o modelo matemático é ajustado a superfície de resposta, será realizado o teste com a estatística  $F$ . Geralmente, se o valor de  $F_0$  for menor que a estatística crítica  $F_{\alpha, k, (n_c-1)}$ , para um dado nível de significância  $\alpha$ , significa que não existe uma curvatura acentuada no plano e portanto o polinômio pode ser adotado como boa aproximação da superfície de resposta (MONTGOMERY, 1991). Ao mesmo tempo, o teste aponta quais são os fatores mais importantes na modelagem.

Geralmente, a análise de variância pode ser resumida no Quadro 2.6. É importante ressaltar que esses resultados podem ser obtidos facilmente por meio de softwares estatísticos (STATISTICA, MINITAB). Além dessa vantagem, na maioria dos programas computacionais está incluído o valor  $p$ , conforme descrito anteriormente.

**QUADRO 2.6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA, FATORIAL  $2^2$**

Fonte de Variação	Soma Quadrado	<i>g.l.</i>	Quadrado Médio	F
Regressão ( $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l$ )	$SS_{\beta}$	K	$MS_{\beta} = SS_{\beta}/k$	$MS_{\beta} / MS_E$
Interação	$SS_{INTERAÇÃO}$	1	$MS_I = SS_{INTERAÇÃO}$	$MS_I / MS_E$
Curvatura do plano	$SS_{CURVATURA}$	k-1	$MS_C = SS_{CURVATURA}/k-1$	$MS_C / MS_E$
Erro	$SS_E$	$n_c-1$	$MS_E = SS_E/n_c-1$	
Total	$SS_T$	n-1		

Uma vez concluído que na região de experimentação, a variação da resposta é bem modelada por uma função linear dos fatores, pode-se iniciar um procedimento de busca da melhor condição de operação, ou seja, procura-se determinar os níveis dos fatores quantitativos que otimizam a resposta de interesse. Com esse objetivo,

novos experimentos são planejados, variando-se os parâmetros na direção que, segundo o modelo matemático, levará a uma mais rápida otimização da resposta. Segundo MONTGOMERY (1991), esse processo pode ser chamado de *técnica seqüencial* que pode ocorrer de duas maneiras, conforme segue.

- Se um ponto qualquer da superfície (pode representar as condições atuais de operação de um processo) está distanciado das condições ótimas de operação e é necessário se aproximar ou determinar a região de resposta, a análise da superfície de resposta pode ser interpretada como a ascensão a uma montanha, onde o pico representa a resposta máxima do experimento. Esse método é denominado de máxima pendente em ascensão;

- Se ocorrer o contrário, ou seja, a aproximação ocorre na forma de descenso, o ponto ótimo será a resposta mínima da superfície, e esse procedimento também é conhecido como método de máxima pendente em descenso.

4. Finalmente, a última etapa proposta por HILL & HUNTER (1966) é **estudar a superfície de resposta na região de interesse**. Essa etapa deve ser realizada depois que se comprova a validade do modelo matemático e tem como objetivo determinar os níveis ótimos do sistema investigado. MONTGOMERY (1991) relata que uma maneira de localizar o ponto ótimo é por meio da técnica de localização do ponto estacionário e planejamento composto central (descrito anteriormente).

O ponto ótimo, se realmente existe no sistema investigado, será definido pelo conjunto de pontos  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  para os quais as derivadas parciais se igualam a zero, conforme a eq. (2.21).

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial y}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial y}{\partial x_k} = 0 \quad (2.21)$$

Esse ponto é denominado de *ponto estacionário*, que pode representar um ponto máximo de resposta, um ponto mínimo ou um ponto de sela (MONTGOMERY, 1991; BOX & HUNTER, 1957). A solução geral do ponto

estacionário é obtida quando o modelo de segunda ordem (eq.(2.11)) é escrito em notação matricial, conforme a eq. (2.22) (MONTGOMERY, 1991).

$$y = \beta_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x} \quad (2.22)$$

sendo que,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_{11}, \beta_{12}/2, & \dots & \beta_{1k}/2 \\ & \beta_{22}, & \dots & \beta_{2k}/2 \\ & & \dots & \vdots \\ & & & \vdots & \beta_{kk} \end{bmatrix}$$

Nessa representação matricial  $\mathbf{b}$  é um vetor ( $k \times 1$ ) dos termos lineares,  $\mathbf{B}$  é uma matriz simétrica ( $k \times k$ ), cujos elementos da diagonal são coeficientes quadráticos puros ( $\beta_{ii}$ ) e os elementos fora da diagonal correspondem à metade dos termos de interação ( $\beta_{ij}$ ,  $i \neq j$ ) do polinômio algébrico.

A derivada da eq. (2.22) com relação aos elementos do vetor  $\mathbf{x}$  é dada pela eq. (2.23).

$$\partial y / \partial \mathbf{x} = \mathbf{b} + 2\mathbf{B}\mathbf{x} = 0 \quad (2.23)$$

O ponto estacionário é a solução da eq. (2.23), cujo resultado é dado pela eq. (2.24).

$$\mathbf{x}_0 = -\frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} \quad (2.24)$$

MONTGOMERY (1991) ressalta que uma vez determinado o ponto estacionário, algumas vezes será necessário caracterizar a superfície de resposta com a vizinhança imediata a esse ponto. Neste caso, os autores propõem que seja realizada uma análise mais formal (análise canônica) na superfície de resposta, conforme será descrito a seguir (MONTGOMERY, 1991; HILL & HUNTER, 1966; BOX & HUNTER, 1957).



### 2.4.3 Análise canônica de superfície de resposta

Quando é determinado o ponto estacionário ( $\mathbf{x}_0$ ) ou os níveis ótimos dos fatores ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) que maximizam a resposta, minimizam ou representam um ponto de sela (é o ponto crítico que não é máximo local nem mínimo local), em alguns experimentos industriais será necessário caracterizar a superfície de resposta na vizinhança desse ponto. Assim, com base na literatura de experimentos industriais alguns pontos importantes desse procedimento são apresentados (MYERS & MONTGOMERY, 1995; MONTGOMERY, 1991; BOX & DRAPER, 1987; BOX & HUNTER, 1957; COCHRAN & COX, 1957).

Para ilustrar a técnica considere-se um experimento fatorial  $2^k$ . O primeiro passo será transformar o polinômio de segunda ordem (eq. (2.11)) para um modelo canônico (eq. (2.25)). Nesse novo sistema de coordenadas o ponto estacionário passa a ser a origem e os eixos ( $w_k$ ), devem ser rotacionados até o ponto em que são paralelos aos eixos principais da superfície ajustada. Segundo (MONTGOMERY, 1991), para se determinar os valores das raízes ( $\lambda_i$ ) da equação canônica que passa por esse ponto é utilizada a eq. (2.26).

$$y = y_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (2.25)$$

sendo que  $y_0$  representa a resposta no ponto  $\mathbf{x}_0$ ,  $w_k$  é a combinação linear das  $x_i$  e as  $\lambda_i$  representa as constantes ou as raízes de uma matriz ( $\mathbf{B}$ ).

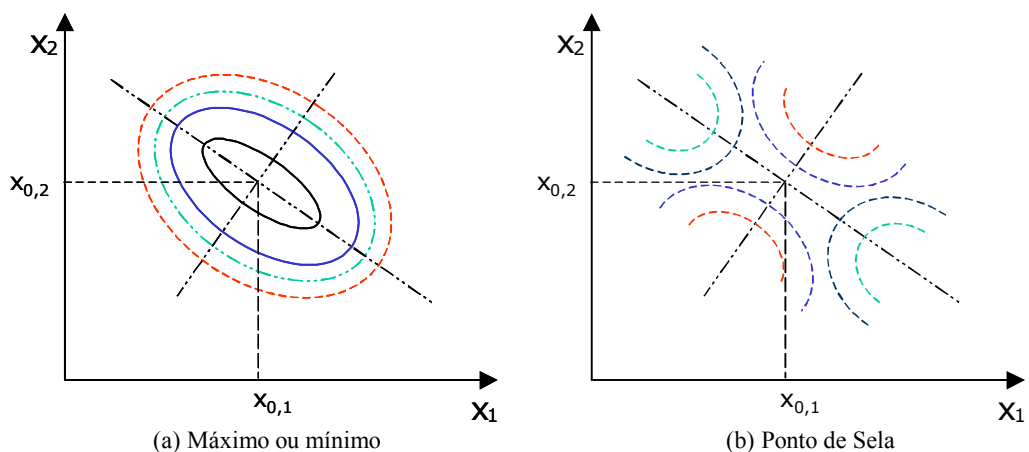
$$[\mathbf{B} - \lambda I] = 0 \quad (2.26)$$

sendo que,  $\mathbf{B}$  é uma matriz formada pelos coeficientes quadráticos puros (diagonal) e pelo valor médio dos coeficientes de interação (fora da diagonal),  $\lambda$  são as raízes do polinômio quadrático e  $I$  (determinante) é o operador matemático que transforma a matriz quadrática em números reais.

Uma vez construído o modelo canônico, algumas características da superfície de resposta devem ser observadas. As principais são (BOX & HUNTER, 1957):

- Se todas as raízes  $\lambda_i$  são negativas, significa que o gráfico de contornos da superfície ( Figura 2.10(a)) de resposta será na forma de uma elipse, onde o centro  $\mathbf{x}_0$  (ponto estacionário) do sistema é o ponto máximo. Caso os sinais sejam positivos significa que esse ponto é de resposta mínima.

- Se os sinais  $\lambda_i$  são diferentes, significa que  $\mathbf{x}_0$  é um ponto de sela, conforme representado pela Figura 2.10(b). Esse ponto também é conhecido como ponto de máximo e mínimo. Ainda, se ao comparar as raízes do modelo canônico, se uma delas for menor quando comparada com a outra, pode-se dizer que a pendente da superfície no eixo da menor raiz será atenuada.



**FIGURA 2.10** - GRÁFICOS DE CONTORNO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA  
Fonte: MONTGOMERY (1991).

Segundo MONTGOMERY (1991) e BOX & HUNTER (1957), em alguns problemas, será necessário determinar a relação que existe entre as variáveis canônicas ( $w_1, w_2$ ) e as variáveis ( $x_1, x_2$ ) utilizadas no projeto experimental. Essas expressões matemáticas podem ser utilizadas para analisar os pontos adjacentes ao ponto estacionário no espaço  $w_i$ , assim como para transformar as intersecções ( $w_1, w_2$ ) nos eixos principais ( $x_1, x_2$ ). Os autores descrevem que a relação das variáveis pode ser representada pela eq. (2.27).

$$w_i = \mathbf{M}'(x_i - \mathbf{x}_0) \quad (2.27)$$

sendo que  $\mathbf{M}$  é uma matriz ortogonal ( $k \times k$ ), onde os elementos ( $m_{11} \ m_{12} \dots \ m_{1i}, m_{21} \ m_{22} \dots \ m_{2i}, \dots, m_{k1} \ m_{k2} \dots \ m_{ji}$ ) são os autovalores normalizados do polinômio ajustado, associados as raízes ( $\lambda_i$ ) do modelo canônico. Segundo MONTGOMERY (1991), as equações normalizadas do sistema podem ser construídas por meio da eq. (2.28).

$$(\mathbf{B} - \lambda_i \mathbf{I}) * \mathbf{m}_i = 0 \quad (2.28)$$

sendo que a soma do quadrados dos elementos  $m_{ji}$  de cada uma das coluna da matriz deve ser igual a um ( $\sum_{j=1}^k m_{ji}^2 = 1$ ).

Para resolver as equações será necessário atribuir um valor arbitrário a umas das variáveis desconhecidas  $m'_i$  ou  $m'_{ji}$ . Em seguida, serão determinados os elementos da matriz. Porém, como o objetivo é obter os parâmetros de  $\mathbf{M}$  normalizados, será necessário que cada um desses valores seja dividido pela eq. (2.29) (MONTGOMERY, 1991; BOX & HUNTER, 1957).

$$\sqrt{(m'_i)^2 + (m'_{ji})^2} \quad (2.29)$$

sendo que  $m'_i$  e  $m'_{ji}$  representam os parâmetros atribuídos arbitrariamente no início do processo para cada um dos sistemas.

Finalmente, com a resolução da eq. (2.28) é determinada a relação entre as variáveis independentes ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) do polinômio ajustado e do modelo canônico ( $w_1, w_2, \dots, w_k$ ). Ao mesmo tempo, novos experimentos de confirmação de resultados podem ser planejados.

A seguir, no próximo capítulo são descritos os experimentos industriais que foram planejados e analisados estatisticamente com os conceitos e técnicas apresentadas anteriormente.

## 3 EXPERIMENTOS INDUSTRIAIS

### 3.1 Estudo de um processo industrial

Este capítulo apresenta a aplicação dos conceitos e técnicas de planejamento e análise de experimentos, descritos no capítulo 2. O objetivo é descrever os experimentos industriais que foram realizados para determinar os principais parâmetros de controle e os níveis de regulagens de um processo de fabricação de produtos plásticos. O estudo foi desenvolvido em uma empresa localizada na cidade de Jundiaí, interior de São Paulo, com a colaboração de seus funcionários, no período de outubro de 2000 a outubro de 2001.

A primeira atividade realizada pelos pesquisadores (o termo ‘pesquisadores’ será utilizado para referir-se ao mestrando e ao respectivo orientador) foi encaminhar uma carta de apresentação do projeto às empresas da Região, conforme o Anexo B. Foram selecionadas quarenta e oito empresas, das quais três responderam a proposta. Desse pequeno grupo foi selecionada a empresa que desconhecia as técnicas de planejamento e análise de experimentos industriais. Além desse ponto, ela se mostrou interessada e aberta a desenvolver um trabalho desse tipo.

Assim, nas próximas seções, será apresentada uma breve caracterização da empresa **ABC**, os processos de transformação de materiais que são utilizados pela empresa, a organização dos experimentos industriais, os resultados e a análise estatística desses experimentos.

### 3.2 Empresa estudada

No início da fase experimental foram realizadas reuniões para que os pesquisadores conhecessem a empresa, seus processos de fabricação e produtos, e também para apresentar os conceitos das técnicas de planejamento e análises de

experimentos aos funcionários das áreas de engenharia de processo e controle de qualidade.

A empresa estudada, é uma empresa de porte médio, de capital fechado que atua no mercado nacional desde 1957, e há dois anos no mercado externo. Atualmente, a empresa está dividida em seis unidades industriais, todas elas localizadas na cidade de Jundiaí / São Paulo.

O principal negócio da empresa é o desenvolvimento, a fabricação, montagem e comercialização de produtos plásticos (assentos sanitários, armários e espelhos, caixas d'água, banheiras, acessórios para banheiros, cantoneiras e chuveiros, válvulas e adaptadores, mangueiras, etc.) utilizados na construção civil.

O principal processo de produção nesse tipo de indústria é o sistema MTO (*Make to order*). Nesse processo os produtos são fabricados e montados a partir dos pedidos e das especificações técnicas dos clientes (SLACK et al., 1997).

Desde os anos '90, a empresa tem investido em novos equipamentos, na melhoria de suas instalações, no treinamento das pessoas e na melhoria de qualidade dos produtos. Todas essas mudanças no ambiente de trabalho estão sendo provocadas, principalmente, pelas ações de órgãos governamentais que controlam o impacto ambiental produzido pela transformação de plásticos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2001), pelas exigências das normas internacionais de qualidade como a ISO 9000 e ISO 14000 (PLÁSTICO, 2001), pelas necessidades dos clientes e pela concorrência de outros fabricantes do setor de plásticos.

Assim, como resultado desses esforços a empresa já observa um aumento dos índices de competitividade. Nos últimos anos (1999/2000) seu faturamento anual cresceu 18%, ao mesmo tempo passou a fabricar cerca de 60 a 100 novos produtos por ano.

### **3.3 Processos de transformação de materiais**

A seguir são descritos os processos de transformação dos materiais, (Polipropileno - PP, Polietileno Tereftalato - PET, Polietileno de alta densidade - PEAD, Policloreto de Vinila - PVC e Policarbonato - PC), que a empresa utiliza para fabricar os componentes plásticos. Todas as informações foram retiradas das

apostilas que os funcionários da empresa utilizam para treinar os reguladores de cada um dos processos de fabricação (EMPRESA ABC, 2001).

**1. Processo de moldagem plástica por injeção:** é o processo mais utilizado pela empresa na transformação desses materiais. A principal razão é o avanço tecnológico alcançado pelos termoplásticos (são os materiais que podem ser fundidos pela transferência de calor e solidificados quando resfriados, sem nenhuma alteração química). Entre outras vantagens estão: a autonomia industrial que as máquinas injetoras alcançaram nos últimos anos; flexibilidade na fabricação (diferentes geometrias dos componentes) e manutenção dos moldes, é possível produzir economicamente e esteticamente os componentes plásticos. Ainda, conforme o número de cavidades do molde é possível aumentar a produção da máquina injetora.

Entre as principais resinas que são utilizadas neste processo está o polipropileno (PP), que é obtido pela polimerização do propeno ou propileno (gás inflamável, que pertence a família dos hidrocarbonetos ( $C_3H_6$ )). Esse termoplástico foi desenvolvido em 1957 e utilizado pelas indústrias por volta de 1959. Alguns dos tipos de PP que foram desenvolvidos para suprir as aplicações específicas são:

- **Polipropileno copolimerizado com polisobutileno ou com etileno.** É uma resina utilizada para fabricar produtos com resistência ao impacto. Uma consequência indesejável deste material é a baixa resistência à tração, diminuição na rigidez e na resistência térmica.

- **Polipropileno com tratamento anti-estático.** Os aditivos anti-estáticos normalmente são empregados para evitar o carregamento eletrostático do PP. A principal vantagem é que não influem sobre as propriedades mecânicas, químicas e térmicas da resina.

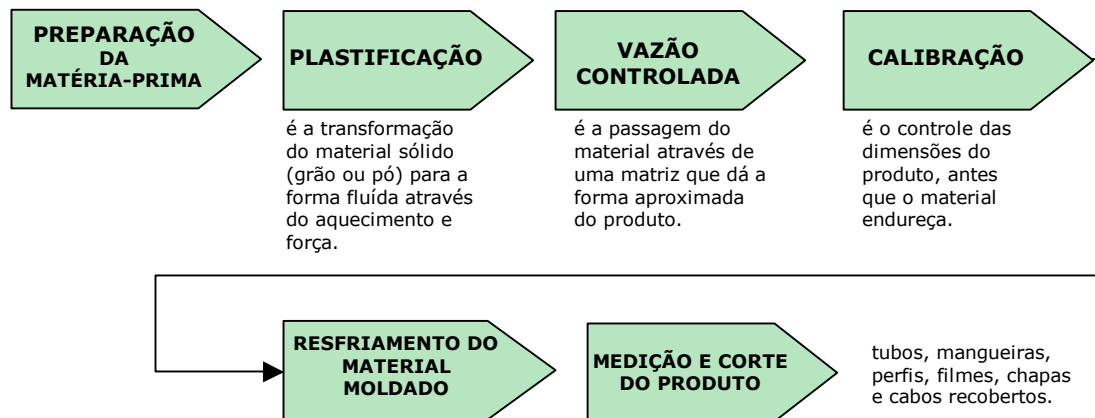
- **Polipropileno reforçado.** Os principais reforços empregados para o PP são: asbestos, fibra de vidro, micro esferas de vidro, talco e carbonato de cálcio. Com relação ao PP não reforçado, as principais vantagens do PP reforçado são: melhor

resistência aos produtos químicos, melhor resistência térmica, menor resistência ao impacto, maior rigidez, maior dureza superficial, melhor estabilidade dimensional e reduz a contração do material no molde durante o resfriamento. Ainda, quando é utilizado o talco no PP, incorpora uma melhor resistência à umidade, além de atuar como um lubrificante, facilitando o processo de injeção no molde.

**2. Processo de moldagem de corpos soprados:** é um processo utilizado para fabricar produtos plásticos ocios soprados. A moldagem a sopro (*blow-molding*) por extrusão pode ser dividida em duas fases. A primeira fase compreende a plastificação da matéria-prima e a pré-formação de um tubo. Na segunda fase, através da injeção de ar comprimido, esse tubo é resfriado e moldado conforme a geometria específica do molde. Uma das matérias-primas mais importante utilizada na fabricação desse tipo de componente é o polietileno. Entre as principais características que justificam o consumo e a transformação dessa resina termoplástica estão: baixo custo, fácil processamento, excelentes propriedades elétricas, ausência de odor e toxicidade, boa flexibilidade a baixas temperaturas, excelente resistência química e baixa permeabilidade a vapor d'água.

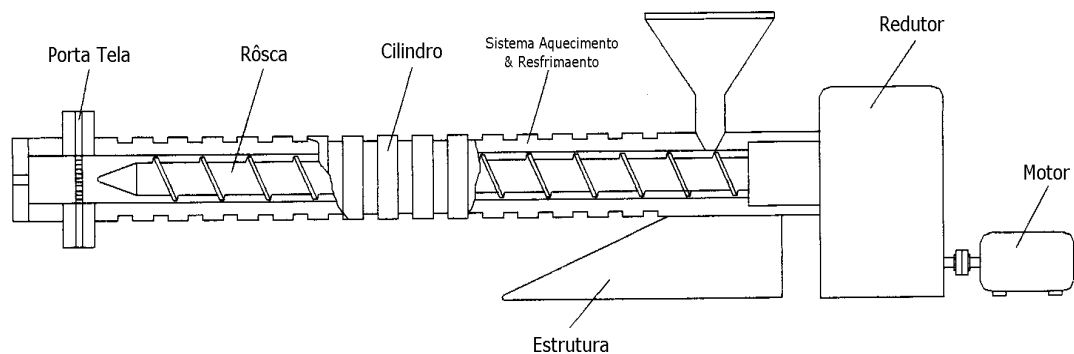
Uma das limitações desse processo de transformação são as dimensões geométricas (espaço ocupado) dos componentes plásticos soprados (garrafas, bujões, assentos e recipientes de todos os tamanhos). Frequentemente, esses produtos demandam máquinas e matrizes de grandes dimensões e medidas mais rígidas são necessárias para a manutenção ou funcionamento dos equipamentos.

**3. Processo de extrusão:** a extrusão pode ser descrita como a moldagem contínua de um material. Na Figura 3.1, são descritas as diferentes etapas do processo.



**FIGURA 3.1 - ETAPAS DO PROCESSO DE EXTRUSÃO**

A extrusora em geral é construída com um ou dois parafusos, que giram dentro de um cilindro aquecido. O formato do parafuso depende dos requisitos básicos do processo, a saber: taxa de rendimento, qualidade da fundição e matéria-prima (DOW, 2001). Essa máquina pode ser representada pela Figura 3.2.

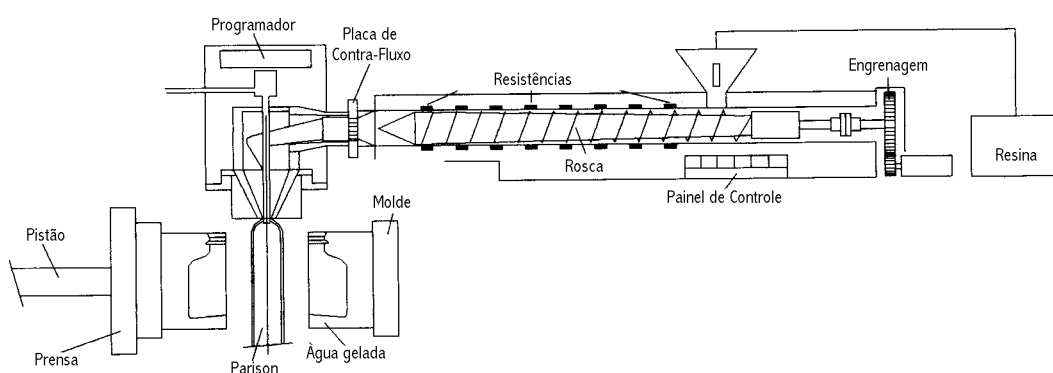


**FIGURA 3.2 - ESQUEMA DE UMA EXTRUSORA SIMPLES**

**4. Processo de rotomoldagem ou moldagem rotacional:** este processo de transformação é representado pela Figura 3.3. A moldagem rotacional consiste em colocar a matéria-prima na forma líquida ou fundida, dentro de um molde confeccionado em chapa de aço ou alumínio fundido. Em seguida, o molde é fechado e colocado dentro de um forno aquecido a altas temperaturas (a temperatura depende do material que está sendo utilizado). O equipamento que prende o molde possui um



sistema de movimentação de rotação e translação. Com esses movimentos a matéria-prima se adere gradualmente a todas as partes internas do molde e se distribui homogeneamente durante o tempo de ciclo de produção do componente plástico. Após esta operação, o molde é retirado do forno e resfriado através de um jato de ar comprimido ou por uma mistura de ar e água pulverizada. Decorrido o tempo de resfriamento, o molde é aberto e o produto é retirado para realizar o acabamento final.



**FIGURA 3.3 - PROCESSO DE ROTOMOLDAGEM**

Esse processo é utilizado para a produção de produtos de grandes volumes. Isto ocorre em função do baixo custo de fabricação do projeto do molde, se comparado a outros processos, porém, devido ao reduzido número de cavidades do molde é menos produtivo.

**5. Processo de poliuretano expandido:** o processo de injeção de poliuretano consiste em misturar dois materiais, um líquido e outro viscoso. Esses produtos são aquecidos a uma determinada temperatura e sob pressão constante em um circuito fechado de circulação. Essa mistura é injetada na forma líquida no interior da peça fabricada pelo processo de transformação por sopro ou diretamente dentro de um molde de alumínio revestido por epóxi.

Nesse processo existem basicamente dois tipos de máquinas, as que trabalham com alta pressão e baixa pressão. Os equipamento de alta pressão permitem que a mistura dos materiais seja mais homogênea, visto que os dois materiais são injetados sob pressão em um compartimento separado. Por outro lado,

as máquinas de baixa pressão realizam a mistura dos materiais mecanicamente (misturador movido por um motor).

Os poliuretanos (PU's) são normalmente produzidos pela reação de um isocianato (aromático, alifático) com um polioli (polieteres, poliésteres). Outras matérias-primas utilizadas para controlar ou modificar a reação química e as propriedades finais dos PU's são os aditivos (catalisadores, agentes de expansão, cargas, agentes antienvelhecimento, corantes e pigmentos) e os propelentes (água e Frigen). Entre os produtos obtidos com os diferentes tipos de PU's estão: os colchões, estofados e assentos automotivos, painéis, pára-choques, isolamento térmico de geladeiras, etc.

### **3.4 Definição do objeto de estudo**

Conforme o procedimento experimental, apresentado no Capítulo 2, a próxima etapa é definir o(s) objetivo(s) dos experimentos industriais. Nesta atividade as seguintes informações foram consideradas pelos pesquisadores:

- ações de melhoria no desenvolvimento de produtos já estavam sendo implementadas e desta forma, a aplicação de técnicas de planejamento e análise de experimentos nesse processo não traria grandes benefícios para a melhoria de qualidade;
- a flexibilidade do processo de fabricação, que permite a realização dos experimentos planejados sem afetar o planejamento de produção da empresa;
- os defeitos nos componentes plásticos, a empresa constantemente enfrenta problemas de qualidade de fabricação de alguns dos seus processos, que geram perdas e problemas com os clientes;
- se ao aplicar as técnicas de planejamento e análise de experimentos industriais, os custos decorrentes da má qualidade do produto são reduzidos.

Assim, o estudo se concentraria na engenharia de processos da empresa, ou seja, o principal objetivo *seria melhorar as características de qualidade de um dos processos de fabricação*. Especificamente, foi selecionado como objeto de estudo o processo de moldagem plástica por injeção, por ser o mais crítico e com maior número de problemas.

Estudos realizados por CHEN & LIU (1999) comprovam que se os parâmetros de controle desse processo de fabricação são definidos equivocadamente, perdas de qualidade e problemas nos moldes de fabricação dos componentes plásticos podem ocorrer. Os autores ressaltam que esses erros influenciam diretamente nos custos do projeto do produto.

Entre os processos de injeção utilizados pela empresa, foi selecionado o processo responsável pela fabricação de um componente, que apresentava problemas de qualidade de fabricação. Esse produto é denominado de “Porca de acionamento - VT/P”, ilustrado na Figura 3.4.



**FIGURA 3.4** - COMPONENTE PLÁSTICO

Na fabricação desse componente é utilizado o material de transformação polipropileno (PP). A empresa fabrica cerca de novecentas e sessenta peças por hora (970 p/h), em períodos de setenta e duas horas contínuas (72 h.). Portanto, percebe-se que é importante evitar e controlar as falhas que ocorrem no processo de fabricação, visto que, esses problemas representam perdas econômicas para a empresa e conseqüentemente atrasos na entrega do produto final aos clientes.

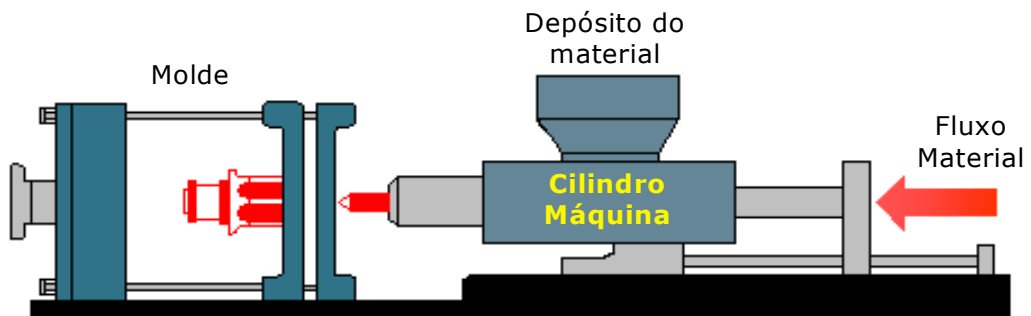
Outro fator considerado ao selecionar este componente plástico é a disponibilidade das máquinas injetoras na linha de produção, isto é, procurou-se realizar os experimentos industriais sem afetar o planejamento de produção.

### 3.5 Processo de moldagem plástica por injeção

#### 3.5.1 Informações técnicas do processo de fabricação

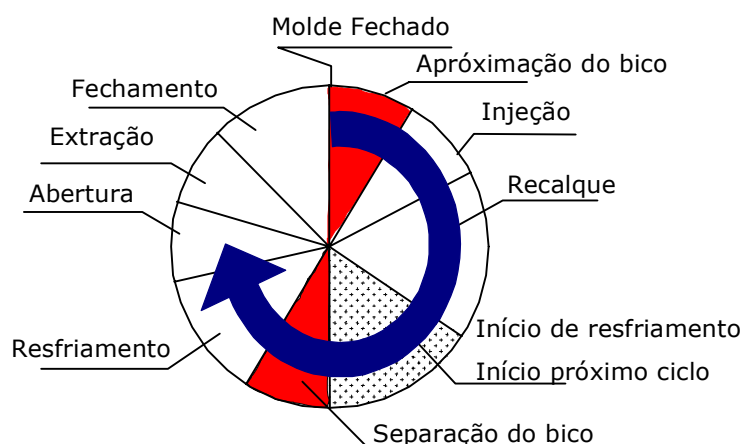
Conforme o procedimento experimental apresentado no capítulo 2, ao definir o objetivo dos experimentos a próxima etapa do plano é coletar todas as informações técnicas do objeto de estudo. Tais dados são apresentados a seguir.

No processo de moldagem plástica por injeção, ilustrado pela Figura 3.5, os grânulos do polímero são fundidos e aquecidos no cilindro da máquina e, em estado líquido, injetado no molde por um pistão.



**FIGURA 3.5 - PROCESSO DE MOLDAGEM PLÁSTICA POR INJEÇÃO**

Na Figura 3.6, é apresentado o processo completo do ciclo de moldagem por injeção. A medida que o polipropileno funde, é forçado a entrar no molde. O enchimento do molde é finalizado com o bombeamento de mais polímero a uma pressão menor (recalque) que a pressão de injeção inicial. Em seguida, o componente é resfriado e retirado do molde através de um braço mecânico (robô). Nesse ciclo de moldagem plástica, todas as etapas são controladas automaticamente pelo processo.



**FIGURA 3.6 - CICLO DE MOLDAGEM**  
Fonte: COMINATTO (1997)

Conforme COMINATTO (1997) e estudos realizados por ACHARYA & MAHESH (1999); NISHINA et al. (1998); ENGEL & HUELE (1996) e MONTGOMERY (1991), os principais fatores de controle do processo de moldagem plástica por injeção são:

**1. Tempo de ciclo:** é o tempo necessário para completar todas as etapas do ciclo de moldagem plástica.

**2. Velocidade de injeção:** é a velocidade de avanço do pistão ou rosca da máquina injetora no instante que o material é injetado (bico encostado no molde). Segundo os funcionários da empresa, é uma variável controlada independentemente pela máquina injetora e que influencia nas características geométricas do componente.

**3. Tempo de recalque:** é o tempo estabelecido no painel da máquina injetora, para que o pistão continue fazendo pressão sobre os componentes injetados, a fim de evitar que os defeitos visuais apareçam. Normalmente o tempo é dado em segundos ou em décimos de segundo.

**4. Tempo de injeção:** é o tempo que a máquina utiliza para realizar a operação de injeção e eventualmente o recalque da peça injetada.

**5. Tempo de resfriamento:** é o tempo que a máquina permanece parada e ao mesmo tempo água industrial (gelada) ou água normal circula pelo molde. Nesse intervalo inicia-se também a dosagem do próximo ciclo. Segundo os funcionários, se o tempo de resfriamento for muito longo, existirá uma demora no ciclo de injeção. Por outro lado, se for muito curto, os componentes serão retirados com a temperatura elevada e possíveis deformações geométricas poderão ocorrer.

**6. Temperatura do molde:** fator controlado através da temperatura (termômetro) e pela quantidade de água que passa pelos canais de circulação do molde. A temperatura do molde torna-se importante na transformação de qualquer material termoplástico porque dependendo do aquecimento (calor), as moléculas do material escoam livremente nos canais internos do molde. O principal objetivo é permitir um fluxo rápido e homogêneo sem perda de temperatura e pressão, garantindo o preenchimento de todas as cavidades ao mesmo tempo.

A empresa utiliza dois tipos de sistema de arrefecimento no molde de fabricação. O primeiro é o sistema com água normal e o segundo é o sistema que distribui água industrial. A temperatura do segundo sistema é controlada através de uma torre de resfriamento e esse tipo de água é utilizada nos dias que a temperatura ambiente está elevada ou quando é necessário reduzir o tempo de resfriamento do molde.

**7. Temperatura da máquina:** fator ajustado eletronicamente que influencia, principalmente, a temperatura do material injetado no molde da máquina. A temperatura do cilindro da máquina é dividida em quatro (4) zonas. A primeira zona, temperatura do bico de injeção, sempre permanece constante em todos os processos e por recomendações dos fabricantes do bico de injeção, o aquecimento deve atingir no máximo 190 °C (graus Celsius). As outras áreas do cilindro da máquina variam de acordo com a composição química dos materiais de transformação.

**8. Pressão de Fechamento:** é a pressão utilizada para regular e manter fechado o molde (aproximar a parte móvel (macho) da fixa (fêmea)). Esta pressão tem que ser maior que a pressão de injeção do material.

**9. Pressão de Injeção:** é a pressão com que o material é injetado no molde. Segundo os funcionários, é controlado através de um manômetro instalado no cilindro da máquina.

**10. Pressão de recalque:** é a pressão que atua dentro do tempo de recalque. Essa operação é realizada no processo de moldagem plástica para garantir que todas as cavidades do molde (espessura do componente) sejam completamente preenchidas.

**11. Contra-pressão ou Pressão de Compactação:** é a pressão hidráulica que a rosca do cilindro deve vencer para retroceder e retornar o fluido hidráulico para o reservatório da máquina injetora.

**12. Dosagem:** é a quantidade de material utilizada para realizar o ciclo completo do processo. O material é escoado através da rotação do parafuso (rosca) que fica dentro do cilindro de aquecimento.

Além desses fatores de controle ACHARYA & MAHESH (1999); NISHINA et al. (1998); COMINATTO (1997) e ENGEL & HUELE (1996) citam outros parâmetros (fatores de ruído) que influenciam no processo de moldagem plástica por injeção.

**1. Temperatura do ambiente:** é a variação de temperatura durante o dia que influencia na estabilidade do processo.

**2. Tempo de vida útil da máquina:** é o desgaste das barras que guiam as partes que estão em movimento. A influencia desse fator é reduzida pela manutenção (lubrificação) diária das máquinas.

**3. Desgastes das cavidades dos moldes:** fator que é atribuído ao tempo de vida útil dos moldes. Esse fator influencia na redução ou no aumento de espessura dos componentes injetados, assim como, no consumo de material.

**4. Ventilação do molde (saída de ar):** tem como objetivo principal eliminar o ar das cavidades do molde (é o ar que fica entre a parte móvel e fixa ao fechar o molde) ou os gases liberados pelos próprios termoplásticos.

**5. Acabamento da superfície da cavidade:** com o objetivo de facilitar a extração do componente moldado, melhorar o acabamento, facilitar o fluxo do termoplástico no interior do molde e reduzir ao mínimo o perigo de abrasão local ou ataque químico, a superfície da cavidade do molde deve ser polida, lapidada e cromada.

### **3.5.2 Problemas do processo de moldagem plástica por injeção**

Nesse processo existem vários problemas (defeitos) decorrentes dos fatores de controle de ajustagem da máquina ou mesmo de fatores de ruído. Os defeitos que ocorrem nos componentes são: a rebarba ou falha, a deformação geométrica do componente, erros dimensionais (visuais), bolhas de ar, as linhas de encontro do fluxo aparecem com intensidade e o componente não é resistente, alguns desses problemas são ilustrados na Figura 3.7.





**FIGURA 3.7** - DEFEITOS NO COMPONENTE PLÁSTICO

Segundo COMINATTO (1997) a falha é decorrente de pouco material injetado no molde. Isso pode acontecer, quando a pressão é insuficiente ou o tempo de injeção é pequeno, ou ainda quando o material não está suficientemente fundido. Por outro lado, quando muito material é injetado no molde, isto é, tempo de injeção e pressão de injeção elevados, ocorre a rebarba.

Os defeitos geométricos de deformação e erros dimensionais ocorrem, de um modo geral, quando o material é injetado a uma temperatura elevada e o tempo de resfriamento é pequeno.

As bolhas de ar internas aparecem quando a pressão de injeção é baixa, a temperatura do cilindro é alta, a pressão de recalque atua num tempo menor que o necessário, o molde está frio ou porque o sistema de canais de alimentação é deficiente. Finalmente, o componente não é resistente quando o ciclo de trabalho é irregular, o sistema de alimentação é deficiente ou o material não alcançou a temperatura ideal de trabalho. Portanto, percebe-se que os defeitos que ocorrem nos componentes moldados por injeção podem ter mais de uma causa provável.

No Quadro 3.1, são apresentadas as soluções ou recomendações elaboradas pelas áreas de Controle de Qualidade e Engenharia do Processo da empresa ABC, para reduzir os defeitos dos produtos fabricados com polipropileno.

**QUADRO 3.1 - POSSÍVEIS SOLUÇÕES NA INJEÇÃO DO POLIPROPILENO**

<b>Defeitos do componente</b>	<b>Recomendações</b>
Rebarba	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ajustar o fechamento do molde;</li> <li>- diminuir a dosagem do material;</li> <li>- diminuir a pressão de injeção;</li> <li>- baixar a temperatura do material;</li> <li>- aumentar a força de fechamento da máquina.</li> </ul>
A cavidade do molde não é preenchida totalmente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumentar a pressão de injeção;</li> <li>- aumentar a dosagem do material;</li> <li>- baixar a temperatura do material;</li> <li>- aquecer o molde;</li> <li>- aumentar o tempo de ciclo;</li> <li>- utilizar máquina que tenha capacidade de injeção maior que o volume do componente.</li> </ul>
Bolhas de ar (internas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumentar a pressão de injeção;</li> <li>- diminuir a temperatura de trabalho;</li> <li>- aumentar o tempo de recalque;</li> <li>- aquecer o molde;</li> <li>- corrigir o sistema de alimentação e aumentar o ponto de injeção.</li> </ul>
Baixa resistência	<ul style="list-style-type: none"> <li>- regular o ciclo de trabalho, verificando qual estágio(s) está irregular;</li> <li>- corrigir o sistema de alimentação;</li> <li>- aumentar a temperatura da máquina.</li> </ul>
Deformação geométrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumentar o tempo de resfriamento;</li> <li>- mudar o sistema de extração;</li> <li>- regular a temperatura do molde;</li> <li>- corrigir o sistema de alimentação e ponto de injeção</li> </ul>
Falha	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumentar a dosagem do material;</li> <li>- aumentar o tempo de recalque;</li> <li>- aumentar a pressão de recalque;</li> <li>- corrigir o sistema de alimentação e aumentar o ponto de injeção;</li> <li>- baixar a temperatura da máquina;</li> <li>- baixar a temperatura do molde.</li> </ul>
A peça é frágil; desfolha-se	<ul style="list-style-type: none"> <li>- trocar o material;</li> <li>- trocar o <i>master batch</i>.</li> </ul>
As linhas de encontro do fluxo aparecem com intensidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumentar a temperatura do material;</li> <li>- aquecer o molde;</li> <li>- aumentar a pressão de injeção;</li> <li>- aumentar a saída do ar ou reduzir a velocidade de injeção;</li> <li>- corrigir o sistema de alimentação e o ponto de injeção.</li> </ul>

Outra prática adotada pela empresa, para regular o processo e reduzir os defeitos, é a construção de uma “ficha técnica” para cada um dos produtos fabricados. Nessa ficha são determinados, baseado no conhecimento prático dos funcionários, quais os valores dos parâmetros (temperatura do molde, pressão de injeção, velocidade de injeção, tempo de injeção, tempo de resfriamento, dosagem, etc) que os operários devem utilizar na hora de regular a máquina, durante o funcionamento ou na etapa de preparação (*set-up*). Ainda, a engenharia de processo recomenda:

“... quando os problemas ocorrem nas peças moldadas por injeção, podem ter mais de uma causa provável. Quando aparecem deve-se analisar todas as regulagens da máquina injetora, (...) e alterar somente uma regulagem por vez, pois assim teremos uma idéia concreta de causa. Normalmente devemos alterar as regulagens de efeitos mais rápidos, como por exemplo, pressões, velocidades e tempos, pois o efeito já ocorre praticamente nas próximas peças, ao passo que uma alteração de temperatura deverá aguardar até a estabilização térmica (...)” (COMINATTO, 1997).

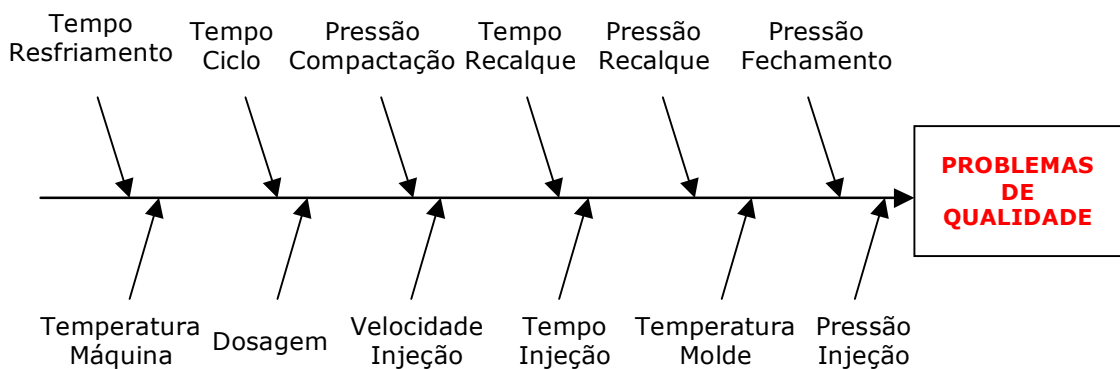
Isto é, ao notar os defeitos no processo, o responsável pelo setor da manufatura deve mudar os valores dos fatores de controle, até se obter resultados com qualidade satisfatória. Porém, ainda que os operadores da máquina e supervisores tenham grande conhecimento e experiência nos processos utilizados pela empresa, eles perdem muito tempo e material para encontrar as regulagens “ideais” dos processos de fabricação dos produtos. Portanto, percebe-se que com a aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos, os funcionários poderiam reduzir esses problemas e, ao mesmo tempo, determinar com mais segurança os níveis ótimos ou as faixas de regulagens dos parâmetros de controle que influenciam o processo de fabricação.

### 3.6 Planejamento de experimentos

#### 3.6.1 Seleção dos fatores de controle e os níveis do processo

TAGUCHI (1993) define que os fatores de controle do processo de moldagem plástica por injeção são os fatores que podem ser regulados com diferentes níveis e que, quando ajustados corretamente podem contribuir na robustez do processo de fabricação.

Conforme o procedimento experimental, descrito no capítulo anterior, nesta fase foi utilizado o diagrama Causa-Efeito proposto por ISHIKAWA (1976). Esse diagrama - Fig. 3.8, foi desenvolvido para representar as relações existentes entre os problemas ou defeitos de qualidade do processo de moldagem por injeção e todas as possíveis causas (variações dos fatores de controle). Esse procedimento também foi utilizado para ilustrar e discutir as idéias (“...o processo é influenciado por um grande número de fatores e todos são considerados importantes na regulagem da máquina injetora...”) nos *brainstorming* realizados entre os funcionários e pesquisadores.



**FIGURA 3.8** - DIAGRAMA DE CAUSA-EFEITO

A partir dessas reuniões, decidiu-se que, entre todos os fatores de controle do processo de injeção, os que mais afetam a qualidade do resultado do processo são: Tempo de injeção, Tempo de resfriamento, Temperatura do molde, Temperatura da máquina, Velocidade de injeção e Pressão de injeção. Esses fatores foram selecionados, porque são classificados como os parâmetros que respondem mais rápido as mudanças que ocorrem nas regulagens do processo e, principalmente, são

os mais sensíveis as variações provocadas pelas fontes internas e externas ao processo (COMINATTO, 1997). Ainda, nos estudos realizados por ACHARYA & MAHESH (1999), ENGEL & HUELE (1996), TAGUCHI (1993) e MONTGOMERY (1991), alguns desses fatores foram investigados e considerados como os principais no processo de injeção plástica.

A Tabela 3.1, apresenta a ficha técnica do processo de moldagem por injeção plástica do produto VT/P. É importante ressaltar que apesar do componente plástico ser produzido e comercializado pela empresa a vários anos, no início desta etapa, não existia a ficha técnica do processo de fabricação. Assim, para reunir essas informações foi necessário programar junto com a área de planejamento e controle de produção da empresa, a fabricação do produto. Neste caso, os pesquisadores apenas observaram e acompanharam o método (descrito anteriormente) que os funcionários utilizam para regular o processo de injeção plástica.

**TABELA 3.1 - FICHA TÉCNICA DO PROCESSO DE INJEÇÃO PLÁSTICA**

Fatores	Regulagem do processo de injeção plástica				
1. Tempo de injeção	3 segundos				
2. Tempo de resfriamento	7 segundos				
3. Temperatura do molde	Água industrial (18° C) / Água normal (24° C)				
4. Temperatura da máquina	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border-right: 1px solid black;">Z<sub>1: BICO</sub>=190°C</td> <td style="width: 50%;">Z<sub>3</sub>=175°C</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">Z<sub>2</sub>=180°C</td> <td>Z<sub>4</sub>=170°C</td> </tr> </table>	Z <sub>1: BICO</sub> =190°C	Z <sub>3</sub> =175°C	Z <sub>2</sub> =180°C	Z <sub>4</sub> =170°C
Z <sub>1: BICO</sub> =190°C	Z <sub>3</sub> =175°C				
Z <sub>2</sub> =180°C	Z <sub>4</sub> =170°C				
5. Velocidade de injeção	50%				
6. Pressão de injeção	20 BAR				

Com as informações técnicas do processo de moldagem plástica, definiu-se que os níveis (faixas de variação) de ajustagem dos fatores de controle para a primeira rodada de experimentos seriam conforme apresentados na Tabela 3.2.

**TABELA 3.2** - NÍVEIS DOS FATORES DE CONTROLE: PRIMEIRA RODADA

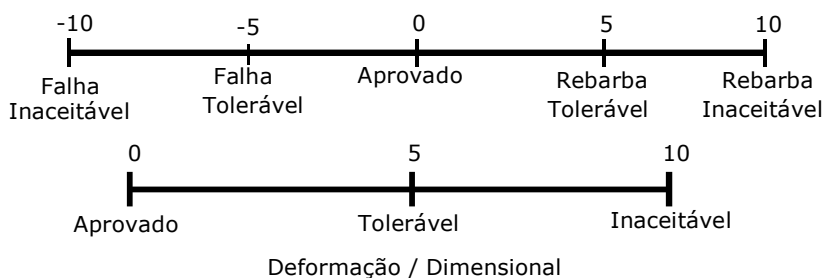
Níveis	Tempo Inj	Tempo Resfriam	Tem Molde	Temperatura Máquina		Vel Injeção	Pressão Injeção
				Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 165°C		
-1	2 (s)	6 (s)	Água industrial	Z <sub>2</sub> : 170°C	Z <sub>4</sub> : 160°C	40 %	18 BAR
				Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 230°C		
+1	10 (s)	15 (s)	Água normal	Z <sub>2</sub> : 240°C	Z <sub>4</sub> : 220°C	100 %	30 BAR
				Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 230°C		

Com o objetivo de reduzir o número de fatores de controle e facilitar o planejamento dos experimentos, todas as zonas de temperatura da máquina (Fator 4), foram consideradas como um único fator do processo. Ainda, é importante ressaltar que esse foi o parâmetro que definiu a seqüência dos testes, visto que o tempo de estabilização da temperatura da máquina é muito alto, fato que inviabilizaria a realização dos experimentos em apenas um dia.

### 3.6.2 Seleção das variáveis de resposta

Segundo a equipe responsável por acompanhar os experimentos industriais, as variáveis de resposta que deveriam ser analisadas no processo de moldagem plástica por injeção eram: Falha ou Rebarba, Erro Dimensional e Deformação dos componentes, problemas que foram descritos anteriormente. Essas respostas foram consideradas porque são as que freqüentemente ocorrem no processo e portanto, representam maiores perdas econômicas para a empresa.

Para o estudo dessas respostas, foram construídas escalas numéricas com a finalidade de transformar as respostas subjetivas (Aprovado, Tolerável e Reprovado) do experimento em números que pudessem ser utilizados na análise estatística, conforme a Figura 3.9.



**FIGURA 3.9 - ESCALA NÚMERICA**

Neste caso, para se avaliar a Falha e a Rebarba do componente foi construída uma escala variando entre as notas -10 e 10, sendo que os dois extremos da escala representam muita falha (-10), ou muita rebarba (10). Quanto mais próximo de zero, menor é o defeito (Falha ou Rebarba), estando no centro da escala (zero) o componente é aprovado pelo sistema de qualidade da empresa. Para os problemas de deformação e erro dimensional a escala varia entre 0 e 10, sendo, a nota 10 dada quando o produto apresenta deformação ou erro dimensional, e zero quando é aprovado. Ainda, nessa escala existiam valores intermediários (1 e 5) para os componentes que tem uma qualidade aceitável e tolerável.

### 3.7 Realização do experimento: Primeira rodada

#### 3.7.1 Matriz de planejamento

Definidas as etapas anteriores, o próximo passo foi construir a matriz de planejamento da primeira rodada de experimentos. Foram considerados seis fatores de controle, cada um deles com dois níveis, resultando em 64 combinações. Observou-se que neste caso era inviável executar o experimento completo, decidindo-se por isso utilizar a técnica de fatorial fracionado  $2^{k-p}$ , ( $k=6$  e  $p=2$ ), com resolução IV. Ao construir um experimento  $2^{6-2}$ , com 16 rodadas de testes (apenas um quarto do experimento completo) se procurou reduzir o número de experimentos, o tempo de experimentação e o consumo do material de transformação (polipropileno). A Tabela 3.3, representa a matriz experimental, com as combinações

dos níveis dos fatores que foram testados na primeira rodada de experimentação do processo de moldagem plástica por injeção.

**TABELA 3.3 - EXPERIMENTO FATORIAL FRACIONADO  $2^{6-2}$**

N Teste	Tempo Inj	T. Resfria	Temperatura Molde	Temperatura Máquina		Velocidade Injeção	Pressão Inj
1	2	6	Água Industrial	Z <sub>1</sub> :190°C Z <sub>2</sub> :170°C	Z <sub>3</sub> :165°C Z <sub>4</sub> :160°C	40	18
2	10	6	"	"	"	100	18
3	2	15	"	"	"	100	30
4	10	15	"	"	"	40	30
5	2	6	Água Normal	"	"	100	30
6	10	6	"	"	"	40	30
7	2	15	"	"	"	40	18
8	10	15	"	"	"	100	18
9	2	6	Água Industrial	Z <sub>1</sub> :190°C Z <sub>2</sub> :240°C	Z <sub>3</sub> :230°C Z <sub>4</sub> :220°C	40	30
10	10	6	"	"	"	100	30
11	2	15	"	"	"	100	18
12	10	15	"	"	"	40	18
13	2	6	Água Normal	"	"	100	18
14	10	6	"	"	"	40	18
15	2	15	"	"	"	40	30
16	10	15	"	"	"	100	30

Nesse experimento se utilizou um molde com quatro cavidades. Cada uma das combinações dos níveis dos fatores de controle foi realizada cinco vezes. Ou seja, para cada regulagem do processo de injeção eram coletadas vinte peças, todas elas foram identificadas pelo número do teste (1 - 16), ciclo de injeção (1 - 5) e número da cavidade do molde (1 - 4). Ainda, o objetivo principal de repetir os ensaios é verificar se as diferenças observadas entre as respostas são significativamente diferentes de zero. Ao mesmo tempo, com esse experimento seria possível estimar com maior precisão os efeitos principais dos fatores analisados no processo de moldagem plástica por injeção (MONTGOMERY, 1991).



### 3.7.2 Análise de resultados

Nessa fase do procedimento experimental, utilizando-se a escala numérica definida anteriormente, as pessoas responsáveis pelo controle de qualidade dos produtos classificaram os componentes plásticos. Os resultados da primeira rodada de experimentação são apresentados na Tabela 3.4.

**TABELA 3.4 - RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO**

<b>N Teste</b>	<b>FALHA/REBARBA (média)</b>	<b>DEFORMAÇÃO (média)</b>	<b>DIMENSIONAL (média)</b>
1	-10	10	10
2	-10	10	10
3	0,75	4,2	0,95
4	-6	7	6,4
5	2	1,2	1
6	0	1	1
7	-10	10	10
8	-10	10	10
9	8	7,6	3,25
10	7	3	1
11	2,75	4,4	1
12	0,75	5	1
13	5,75	5,3	3,7
14	2	1,6	1
15	6,25	3,4	1
16	8,5	3	1,9

Com os dados da Tabela 3.4 e usando o método de sinais, são estimados os efeitos principais e de interação para esse experimento. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5.

**TABELA 3.5 - EFEITOS PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO DOS FATORES - EXP I**

Fatores		Falha/Rebarba	Deformação	Dimensional
Efeitos Principais	E <sub>1</sub> . Tempo Injeção	-1,66	-0,69	0,18
	E <sub>2</sub> . Tempo Resfriamento	-1,47	0,91	0,16
	E <sub>3</sub> . T. Molde	1,41	-1,96	-0,50
	E <sub>4</sub> . T. Máquina	10,53	-2,51	-4,44
	E <sub>5</sub> . Velocidade de Injeção	1,97	-0,56	-0,51
	E <sub>6</sub> . Pressão Injeção	6,91	-3,24	-3,78
Efeitos de Interação	E <sub>12</sub> = E <sub>35</sub>	0,03	1,44	1,41
	E <sub>13</sub> = E <sub>25</sub>	0,78	-0,39	-0,63
	E <sub>14</sub> = E <sub>56</sub>	0,53	-1,34	-1,19
	E <sub>15</sub> = E <sub>23</sub> = E <sub>46</sub>	-2,28	3,41	3,89
	E <sub>16</sub> = E <sub>45</sub>	-0,22	0,09	0,85
	E <sub>24</sub> = E <sub>36</sub>	0,34	-1,34	-1,18

A Figura 3.10, apresenta os gráficos de probabilidade normal. Esses gráficos foram construídos com o software STATISTICA. Nos quais observa-se que alguns efeitos principais e de interação estão distanciados da reta. Isso indica que esses efeitos são significativamente diferentes de zero. A partir do Gráfico de Falha/Rebarba percebe-se que os efeitos principais significativos são: Pressão de Injeção e Temperatura da Máquina (E<sub>4</sub> e E<sub>6</sub>). Para os outros efeitos pode-se ver que estão distribuídos ao longo de uma reta, portanto não são significativos no processo de injeção plástica.

No Gráfico de Deformação verifica-se que os efeitos de interação dos fatores E<sub>15</sub>, E<sub>23</sub> e E<sub>46</sub> são significativos, porém, esses efeitos estão confundidos e dificilmente pode-se afirmar qual é o mais importante no processo de fabricação.

Por meio do Gráfico de Erros Dimensionais, pode-se ver novamente que os efeitos de interação mais significativos são E<sub>15</sub>, E<sub>23</sub> e E<sub>46</sub>. Assim como percebe-se que os efeitos principais diferentes de zero são a Pressão de Injeção e Temperatura da Máquina.

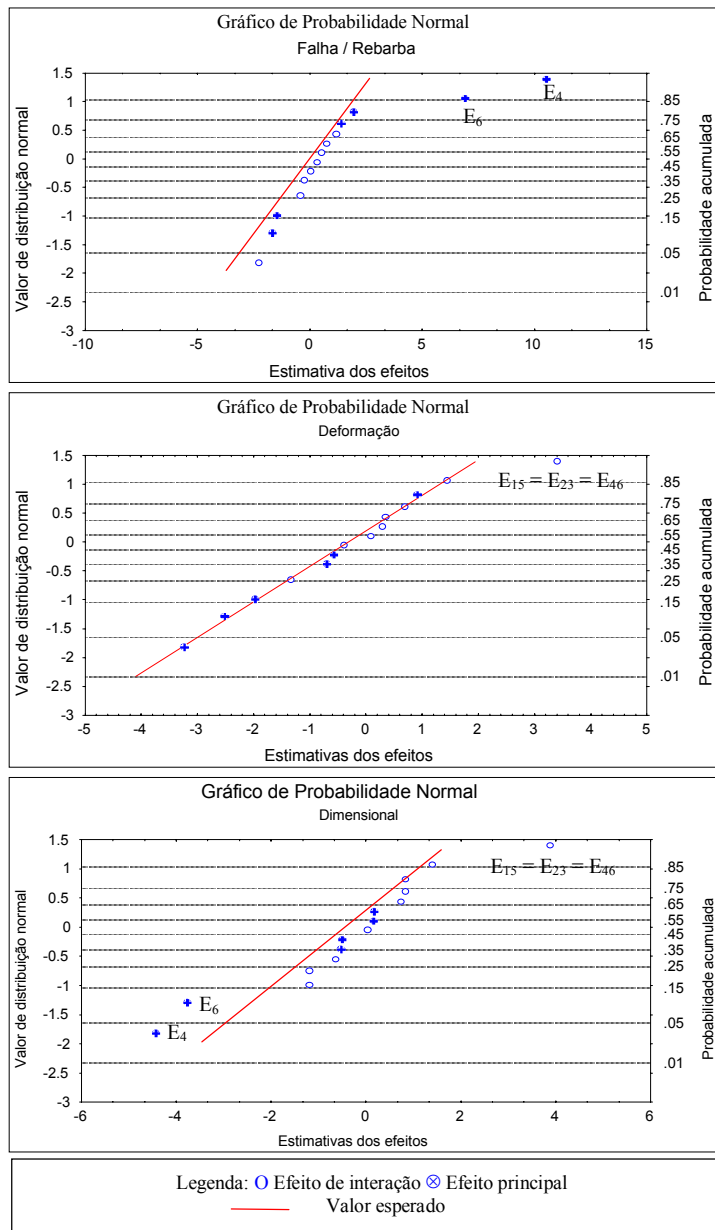


FIGURA 3.10 - GRÁFICOS DE PROBABILIDADE NORMAL - EXP I

Na Figura 3.11 são ilustradas graficamente as variações dos efeitos principais  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$  e  $E_6$ , em função dos níveis dos fatores (-1, +1). Os gráficos confirmam a hipótese de que os fatores: Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção são os únicos que produzem efeitos significativos nas respostas do processo de injeção plástica.

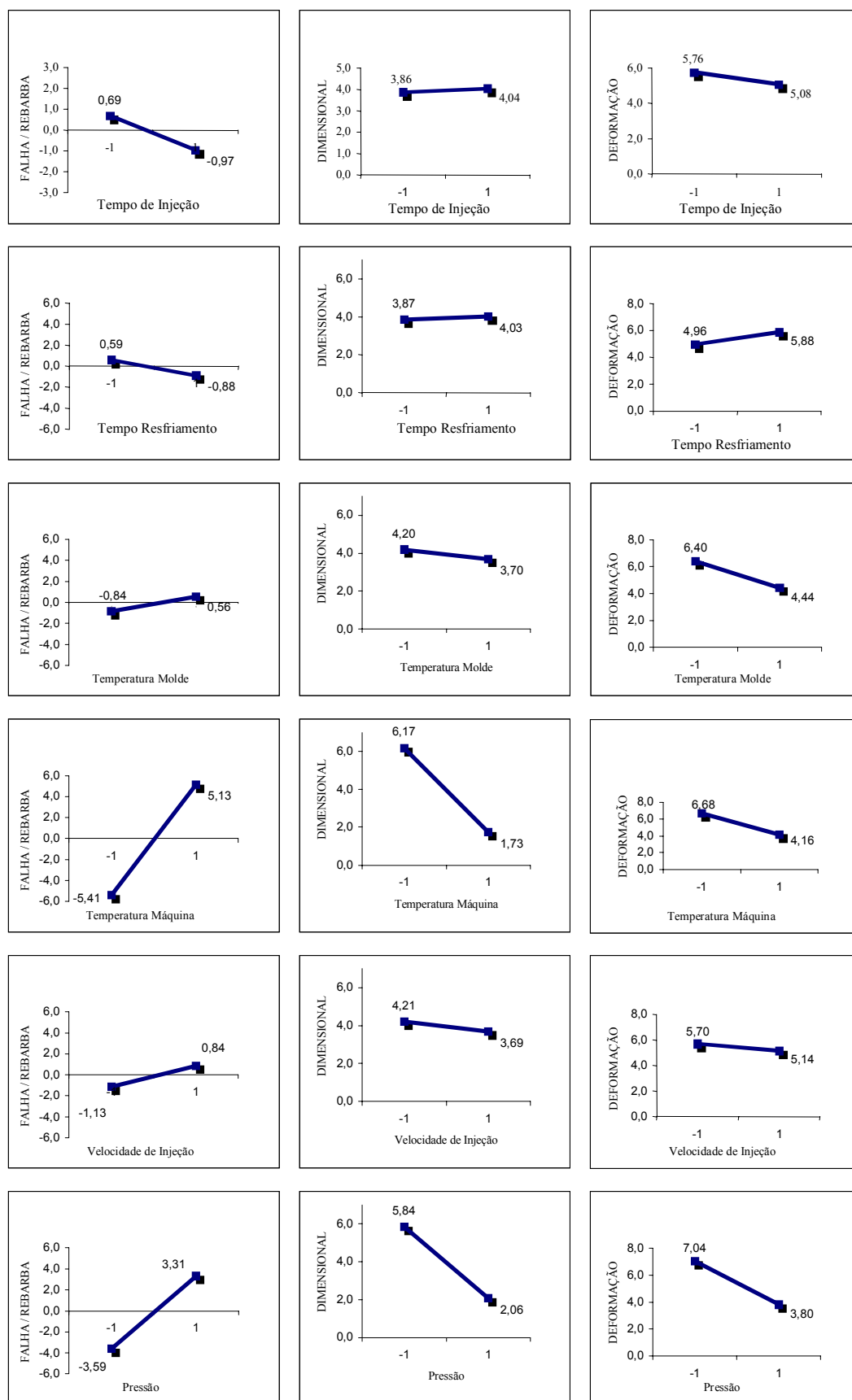


FIGURA 3.11 - GRÁFICOS DE EFEITOS PRINCIPAIS DOS FATORES - EXP I

Com o objetivo de verificar se estatisticamente a variação dos resultados experimentais é produzida por algum(ns) fator(es), a equipe decidiu utilizar a ferramenta de análise de variância (ANOVA). Os testes são realizados com a estatística F. Os valores críticos de F foram retirados das tabelas apresentadas por LEVINE et al. (1998) e MONTGOMERY (1991). Nesse primeiro experimento usou-se um nível de significância de 10% ( $\alpha$ ). A análise de variância é apresentada na Tabela 3.6. A seguir são discutidos os detalhes dos resultados para cada uma das respostas investigadas.

A análise de variância, para a característica de qualidade Falha/Rebarba, demonstra com 90% de confiança que os fatores que influenciam o desempenho do processo são a Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção. Ao mesmo tempo, verifica-se que a Velocidade de Injeção tem um efeito significativo médio. Para as outras variáveis, Tempo de Injeção, Tempo de Resfriamento e Temperatura do Molde, percebe-se que com o teste da estatística F não é possível concluir com segurança sobre os efeitos principais desses parâmetros. Isso ocorre porque os resultados demonstram que existe a probabilidade (valor  $p$  próximo do nível de significância) de desprezar os efeitos principais desses fatores sendo significativos no processo de injeção plástica.

O quadro de ANOVA para a resposta Dimensional, demonstra que os fatores Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção são os que mais produzem um efeito significativo no processo de injeção plástica. Ao mesmo tempo, percebe-se que o teste F aponta que os outros parâmetros, Tempo de Injeção, Tempo de Resfriamento, Temperatura do Molde e Velocidade de Injeção, não estão influenciando o processo de fabricação.

Os resultados de ANOVA para a resposta Deformação, demonstram que os efeitos principais provocados pelos fatores Tempo de Injeção, Tempo de Resfriamento, Temperatura do Molde e Velocidade de Injeção, são desprezíveis. Ainda, nesse quadro verifica-se que a Temperatura da Máquina tem um efeito significativo médio e a Pressão de Injeção é o parâmetro mais significativo no processo de injeção plástica.

TABELA 3.6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS EFEITOS PRINCIPAIS - EXP I

<b>FALHA/REBARBA</b>					
<b>Fonte de variação</b>	<b>Soma Quadrado</b>	<b>g.l.</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor p</b>
1. Tempo Injeção	10,97	1	10,97	3,06	0,11
2. Tempo Resfriamento	8,63	1	8,63	2,40	0,16
3. Temperatura Molde	7,91	1	7,91	2,20	0,17
4. Temperatura Máquina	443,63	1	443,63	123,55	1,0 EXP-06
5. Velocidade Injeção	15,50	1	15,50	4,32	0,07
6. Pressão Injeção	190,79	1	190,79	53,13	4,6EXP-05
Erro ( $\varepsilon$ )	32,32	9	3,59		

<b>DIMENSIONAL</b>					
<b>Fonte de variação</b>	<b>Soma Quadrado</b>	<b>g.l.</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor p</b>
1. Tempo Injeção	0,12	1	0,12	0,01	0,91
2. Tempo Resfriamento	0,11	1	0,11	0,01	0,92
3. Temperatura Molde	1,00	1	1,00	0,10	0,76
4. Temperatura Máquina	78,77	1	78,77	7,96	0,02
5. Velocidade Injeção	1,05	1	1,05	0,11	0,75
6. Pressão Injeção	57,00	1	57,00	5,76	0,04
Erro ( $\varepsilon$ )	89,04	9	9,89		

<b>DEFORMAÇÃO</b>					
<b>Fonte de variação</b>	<b>Soma Quadrado</b>	<b>g.l.</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor p</b>
1. Tempo Injeção	1,89	1	1,89	0,23	0,64
2. Tempo Resfriamento	3,33	1	3,33	0,41	0,54
3. Temperatura Molde	15,41	1	15,41	1,91	0,20
4. Temperatura Máquina	25,25	1	25,25	3,13	0,11
5. Velocidade Injeção	1,27	1	1,27	0,16	0,70
6. Pressão Injeção	41,93	1	41,93	5,20	0,05
Erro ( $\varepsilon$ )	72,54	9	8,06		

Na Tabela 3.5 (apresentada anteriormente), observa-se que os efeitos de interação E<sub>15</sub>, E<sub>23</sub> e E<sub>46</sub> são os mais significativos, entretanto, estão confundidos, conforme pode ser comprovado pela soma de quadrados, apresentada na Tabela 3.7. A análise gráfica (ver Figura 3.10) e estatística (ANOVA) realizadas nessas interações demonstraram que são importantes, porém, com os resultados não foi possível identificar qual delas é a mais significativa no processo de injeção.

**TABELA 3.7 - SOMA DE QUADRADOS DOS EFEITOS DE INTERAÇÃO - EXP I**

<b>Fonte de variação</b>	<b>Soma Quadrado FALHA/REBARBA</b>	<b>Soma Quadrado DIMENSIONAL</b>	<b>Soma Quadrado DEFORMAÇÃO</b>
E <sub>12</sub>	0,004	7,98	8,27
E <sub>13</sub>	2,441	1,56	0,60
E <sub>23</sub>	20,816	60,45	46,58
E <sub>14</sub>	1,129	5,64	7,16
E <sub>24</sub>	0,473	5,52	7,16
E <sub>34</sub>	0,660	2,81	0,33
E <sub>15</sub>	20,816	60,45	46,58
E <sub>25</sub>	2,441	1,56	0,60
E <sub>35</sub>	0,004	7,98	8,27
E <sub>45</sub>	0,191	2,89	0,03
E <sub>16</sub>	0,191	2,89	0,03
E <sub>26</sub>	0,660	2,81	0,33
E <sub>36</sub>	0,473	5,52	7,16
E <sub>46</sub>	20,816	60,45	46,58
E <sub>56</sub>	1,129	5,64	7,16

Depois de realizar a análise de dados, a próxima etapa do plano experimental era apresentar e discutir os resultados com a equipe que acompanha os experimentos na empresa. Nessas reuniões os pesquisadores procuraram demonstrar que o desempenho do processo de injeção plástica é influenciado por apenas dois fatores (Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção).

No entanto, para os funcionários da empresa essas informações confrontavam-se com as recomendações citadas na ficha técnica do processo. Em razão desse resultado e com o intuito de validar as conclusões retiradas das análises estatísticas apresentadas anteriormente, a equipe decidiu discutir duas propostas, a saber:

- Um novo experimento poderia ser realizado com o mesmo número de fatores. Porém, adotando-se esta estratégia a análise estatística pode levar as mesmas conclusões sobre os parâmetros que influênciam o desempenho do processo de fabricação;
- A segunda proposta é eliminar um dos fatores experimentais e planejar a

metade de um experimento completo com cinco fatores, com dois níveis cada um (Fatorial  $2^{5-1}$  - 16 ensaios). Nesse experimento pode ser utilizada a Resolução V. Com esse critério, os efeitos de interação que ocorrem no processo de injeção plástica serão identificados com mais precisão.

Desta forma, conforme as estratégias apresentadas e discutidas nas reuniões a equipe aprovou a segunda proposta. Assim, decidiu-se excluir para a próxima rodada de experimentação o fator Velocidade de Injeção. Esse fator foi eliminado porque a experiência demonstrava que entre os fatores considerados no primeiro experimento este é o último parâmetro que os operadores ou reguladores do processo alteram quando está com problemas de qualidade. Isto ocorre porque entre as informações anteriormente apresentadas pelo Quadro 3.1, não existe nenhuma recomendação que considere a variação deste fator como uma possível solução para os problemas investigados.

Finalmente, depois de cada uma das reuniões, um relatório foi elaborado e apresentado com todas as etapas anteriormente descritas aos funcionários da empresa.

### **3.8 Realização do experimento: Segunda rodada**

#### **3.8.1 Matriz de planejamento**

A Tabela 3.8 apresenta os novos níveis dos fatores de controle usados no segundo experimento. Alguns destes valores foram revistos porque apresentavam uma faixa de variação excessiva, ou seja, quando os experimentos foram realizados alguns problemas ocorreram com a máquina injetora. O mais crítico foi a obstrução do bico de injeção. Isso ocorreu porque o Tempo de Resfriamento no nível +1 era grande e conseqüentemente a máquina injetora permaneceu muito tempo parada e o material solidificou no canal do bico de injeção. Ainda, para o nível máximo (+1) dos fatores, Pressão de Injeção, Tempo de Injeção e Temperatura da Máquina, foram considerados pelos funcionários como condições extremas de uso, isto é, dificilmente seriam utilizadas para regular o processo de moldagem plástica por injeção no dia-a-dia da empresa.



**TABELA 3.8** - NÍVEIS DOS FATORES DE CONTROLE: SEGUNDA RODADA

Nível	Tempo Injeção	Tempo Resfriamento	Temperatura Molde	Temperatura Máquina		Pressão Injeção
-1	2 (s)	6 (s)	Água industrial	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 165°C	18 BAR
				Z <sub>2</sub> : 170°C	Z <sub>4</sub> : 160°C	
+1	5 (s)	10 (s)	Água normal	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 210°C	26 BAR
				Z <sub>2</sub> : 220°C	Z <sub>4</sub> : 200°C	

Com isso, foi possível construir um experimento  $2^{5-1}$  – Resolução V, com 16 rodadas de teste (metade do experimento completo). Segundo MONTGOMERY (1991), os experimentos com essa resolução são utilizados para estimar de maneira única todos os efeitos principais e as interações de segunda ordem, sempre e quando os efeitos principais estejam confundidos com as interações de terceira ordem ou superior. A Tabela 3.9, apresenta a matriz do experimento, com as combinações dos níveis dos fatores que foram investigados.

**TABELA 3.9** - EXPERIMENTO FATORIAL FRACIONADO  $2^{5-1}$ 

N Teste	Tempo Injeção	Tempo Resfriamento	Temperatura Molde	Temperatura Máquina		Pressão Injeção
1	2	6	Água Industrial	Z <sub>1</sub> :190°C Z <sub>2</sub> :170°C	Z <sub>3</sub> :165°C Z <sub>4</sub> :160°C	26
2	5	6	Água Industrial		"	18
3	2	10	Água Industrial		"	18
4	5	10	Água Industrial		"	26
5	2	6	Água Normal		"	18
6	5	6	Água Normal		"	26
7	2	10	Água Normal		"	26
8	5	10	Água Normal		"	18
9	2	6	Água Industrial	Z <sub>1</sub> :190°C Z <sub>2</sub> :220°C	Z <sub>3</sub> :210°C Z <sub>4</sub> :200°C	18
10	5	6	Água Industrial		"	26
11	2	10	Água Industrial		"	26
12	5	10	Água Industrial		"	18
13	2	6	Água Normal		"	26
14	5	6	Água Normal		"	18
15	2	10	Água Normal		"	18
16	5	10	Água Normal		"	26

### 3.8.2 Análise de resultados

Depois de realizar os experimentos, os componentes plásticos foram avaliados pelos funcionários da empresa, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.10. Nesta etapa foram utilizadas novamente as escalas numéricas definidas para a primeira rodada de experimentos.

**TABELA 3.10 - RESULTADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO**

<b>N Teste</b>	<b>Falha/Rebarba (média)</b>	<b>Deformação (média)</b>	<b>Dimensional (média)</b>
1	3,5	0,95	0,45
2	-10	10	10
3	-10	10	10
4	0	5	0
5	-10	10	10
6	0	0,9	0
7	0	0,9	0
8	-10	10	10
9	5,5	0,3	3,55
10	5	0	2,2
11	4,75	0,7	2,9
12	1	3	0,05
13	8	0,65	7,3
14	3,5	0,65	1,15
15	2,25	1,95	1,25
16	5,5	0,55	3,2

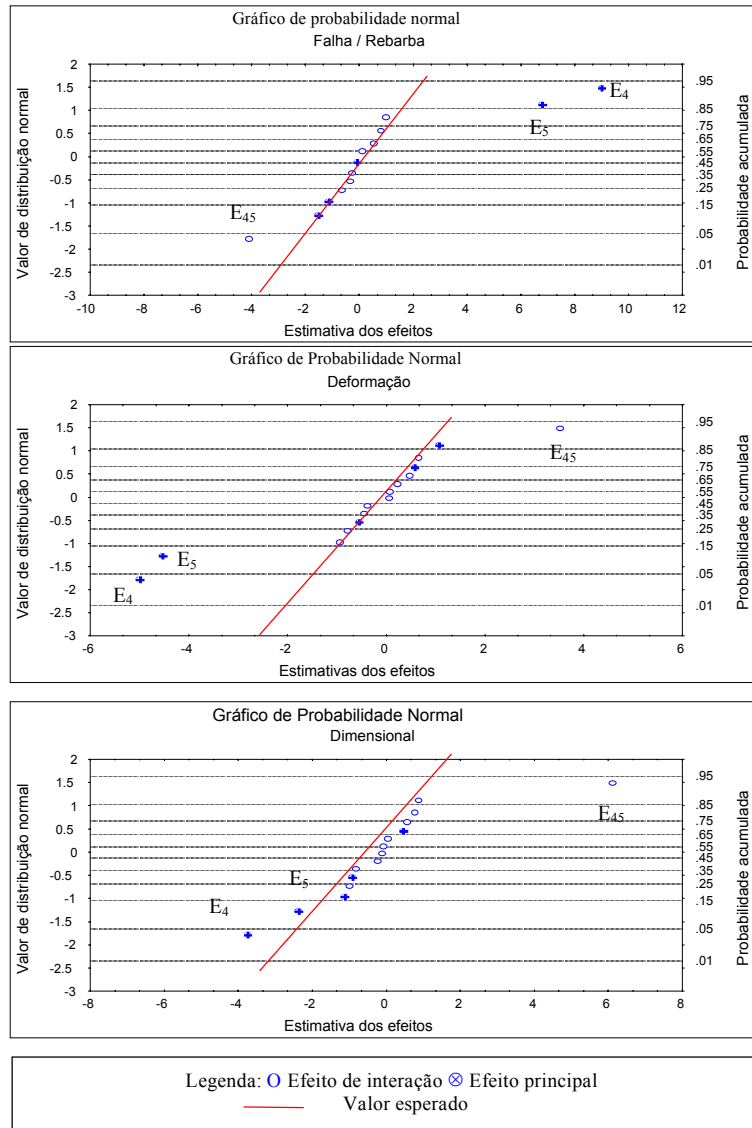
Com as informações da Tabela 3.10, foram estimados os efeitos principais e de interação dos fatores de controle. Esses valores são apresentados na Tabela 3.11. É importante ressaltar que nessa tabela nota-se que os efeitos principais e de interação mais significativos são produzidos pelos parâmetros: Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção, conforme era previsto no primeiro experimento.

**TABELA 3.11** - EFEITOS PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO DOS FATORES - EXP II

Fatores Controle		Falha/Rebarba	Deformação	Dimensional
Efeitos Principais	E <sub>1</sub> . Tempo Injeção	-1,12	0,58	-1,10
	E <sub>2</sub> . Tempo Resfriamento	-1,50	1,08	-0,90
	E <sub>3</sub> . T. Molde	-0,06	-0,54	0,46
	E <sub>4</sub> . T. Máquina	9,00	-4,99	-2,35
	E <sub>5</sub> . Pressão Injeção	6,81	-4,53	-3,74
Efeitos de Interação	E <sub>12</sub>	1	0,66	0,88
	E <sub>13</sub>	0,81	-0,93	0,05
	E <sub>23</sub>	0,56	-0,78	-0,09
	E <sub>14</sub>	-0,25	-0,43	-0,99
	E <sub>24</sub>	-0,62	0,06	-0,79
	E <sub>34</sub>	0,81	0,49	0,58
	E <sub>15</sub>	-0,31	0,23	-0,20
	E <sub>25</sub>	-0,06	0,08	-0,05
	E <sub>35</sub>	0,12	-0,36	0,76
	E <sub>45</sub>	-4,06	3,53	6,14

Na Figura 3.12, são apresentados os gráficos de probabilidade normal para esse experimento. Esses gráficos foram construídos com o software STATISTICA. Em todos os gráficos observa-se que os efeitos principais E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> e E<sub>3</sub> e de interação E<sub>12</sub>, E<sub>13</sub>, E<sub>23</sub>, E<sub>14</sub>, E<sub>34</sub>, E<sub>15</sub>, E<sub>25</sub> e E<sub>35</sub> estão distribuídos ao longo de uma reta. Portanto, não existe nenhum indicativo que esses efeitos sejam significativos no processo de injeção plástica. Por outro lado, com os gráficos comprova-se que os efeitos principais e de interação que influenciam as repostas do processo de moldagem plástica são produzidos pela Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção (E<sub>4</sub>, E<sub>5</sub> e E<sub>45</sub>).

Nos gráficos lineares, apresentados pela Figura 3.13, novamente pode-se ver que os efeitos significativos no processo são produzidos pelos fatores: Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção, enquanto que os efeitos dos outros fatores podem ser desprezados.



**FIGURA 3.12 - GRÁFICOS DE PROBABILIDADE NORMAL - EXP II**

A análise estatística realizada neste experimento é apresentada pela Tabela 3.12, a seguir são discutidas os resultados para todas as características de qualidade investigadas.

Os quadros de ANOVA para as características de qualidade Falha/Rebarba, Dimensional e Deformação geométrica demonstram que os efeitos principais  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  não são significativos no processo de injeção plástica. Isto é, o teste F aponta que a hipótese de que os fatores Tempo de Injeção, Tempo de Resfriamento e Temperatura do Molde não influenciam as respostas do experimento é verdadeira,

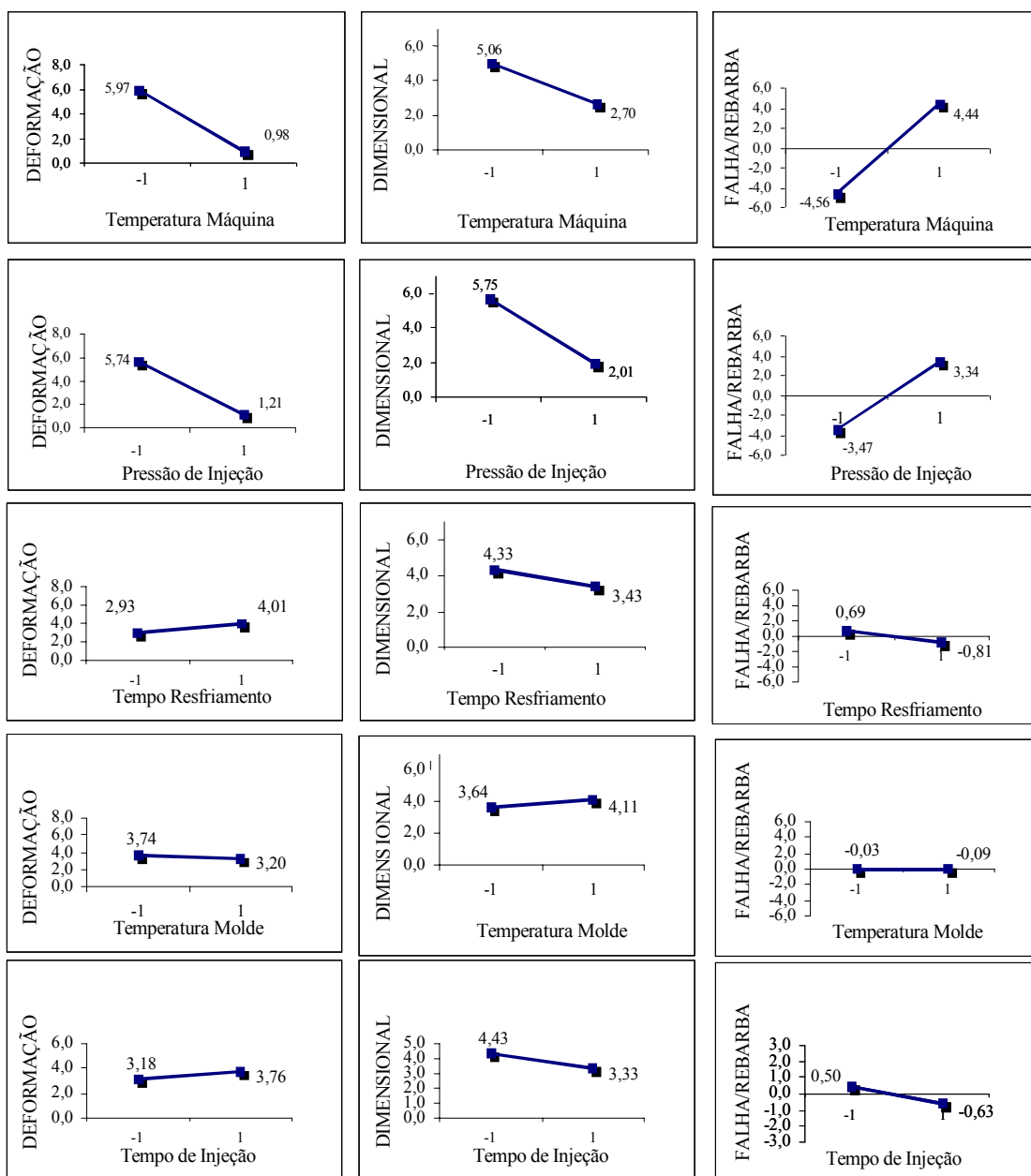
em um nível de significância de 10%. Os testes também indicaram que os fatores Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção produzem efeitos significativamente diferentes de zero. Os testes realizados com esses fatores são significativos porque o valor  $p < \alpha$ , o que certamente reduz a probabilidade de errar nas conclusões.

**TABELA 3.12 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP II,  $F_{0,1,1;10} = 3,29$**

<b>FALHA / REBARBA</b>					
<b>FONTE DE VARIACÃO</b>	<b>Soma Quadrado</b>	<b>g.l.</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor p</b>
1. Tempo Injeção	5,06	1	5,06	0,64	0,44
2. Tempo Resfriamento	9,00	1	9,00	1,14	0,31
3. Temperatura Molde	0,02	1	0,02	0,03	0,97
4. Temperatura Máquina	324,00	1	324,00	41,09	7,7EXP-05
5. Pressão Injeção	185,64	1	185,64	23,55	6,6EXP-04
Erro	78,84	10	7,88		

<b>DIMENSIONAL</b>					
<b>FONTE DE VARIACÃO</b>	<b>Soma Quadrado</b>	<b>g.l.</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor p</b>
1. Tempo Injeção	4,90	1	4,90	0,30	0,60
2. Tempo Resfriamento	3,29	1	3,29	0,20	0,66
3. Temperatura Molde	0,88	1	0,88	0,05	0,82
4. Temperatura Máquina	22,21	1	22,21	1,35	0,07
5. Pressão Injeção	56,06	1	56,06	3,41	0,09
Erro	164,51	10	16,45		

<b>DEFORMAÇÃO</b>					
<b>FONTE DE VARIACÃO</b>	<b>Soma Quadrado</b>	<b>g.l.</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor p</b>
1. Tempo Injeção	1,35	1	1,35	0,22	0,65
2. Tempo Resfriamento	4,68	1	4,68	0,78	0,40
3. Temperatura Molde	1,18	1	1,18	0,20	0,67
4. Temperatura Máquina	99,75	1	99,75	16,60	2,2EXP-03
5. Pressão Injeção	82,13	1	82,13	13,67	4,1EXP-03
Erro	60,10	10	6,01		



**FIGURA 3.13 - GRÁFICOS DE EFEITOS PRINCIPAIS DOS FATORES - EXP II**

Assim, os resultados do segundo experimento foram apresentados e discutidos com os funcionários. Ao se identificar que os fatores Tempo de Injeção, Temperatura do Molde e Tempo de Resfriamento não são significativos para o processo de moldagem plástica por injeção, decidiu-se realizar um terceiro experimento, com apenas dois fatores (Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção), conforme será descrito na próxima seção.

### 3.9 Realização do experimento: Terceira rodada

O objetivo principal da terceira rodada de experimentos é determinar as condições ótimas do processo de moldagem plástica por injeção. Nessa fase, inicialmente os pesquisadores apresentaram aos funcionários os conceitos da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

Em seguida, durante a fase de tomada de decisões, os pesquisadores e funcionários perceberam que para ajustar o processo de fabricação todas as características de qualidade (Falha/Rebarba, Deformação geométrica e Erros dimensionais), deveriam ser estudadas simultaneamente. Esse problema de obter a melhor combinação dos fatores para um conjunto de características de qualidade, foi resolvido com a construção de uma função resposta, denominada de soma quadrática das respostas (SQ). A SQ é uma combinação dos valores da escala estimados para as três variáveis de interesse, apresentada pela eq. (3.1).

$$y_i = (\text{Falha/Rebarba})^2 + (\text{Deformação})^2 + (\text{Dimensional})^2 \quad (3.1)$$

Com essa função, além de facilitar a interpretação da análise estatística porque todos os valores da resposta serão positivos, será possível observar com mais eficiência as mudanças provocadas por uma das características de qualidade investigadas (TAGUCHI, 1993).

#### 3.9.1 Matriz de planejamento

Os níveis de ajustagem que a empresa utiliza para regular o processo de fabricação foram apresentados na Tabela 3.1. Com esses valores os funcionários conseguem fabricar componentes plásticos de boa qualidade. Porém, como dito anteriormente, pequenas alterações nas condições ambientais ou outras fontes de variação desregulam o processo, provocando as perdas de qualidade nos produtos. Como é provável que o ponto ótimo do processo esteja próximo a essa região, os pesquisadores decidiram iniciar um procedimento de busca da melhor condição de operação, ou seja, determinar os níveis dos fatores de controle quantitativos que otimizam a resposta de interesse.

Os níveis que foram utilizados para realizar o terceiro experimento são apresentados na Tabela 3.13. Nesta etapa foi definido um nível intermediário entre o valor máximo e mínimo de cada uma das faixas dos principais fatores de controle identificados anteriormente. O nível intermediário ou ponto central é utilizado para estimar o erro experimental e para verificar se o polinômio de primeira ordem é adequado para ajustar a função reposta às condições ótimas do processo de injeção.

**TABELA 3.13 - NÍVEIS DOS FATORES DE CONTROLE: TERCEIRA RODADA**

Fatores de Controle	Níveis de regulagens					
	Baixo (-1)		Ponto Central (0)		Alto (+1)	
1. Pressão de injeção	18 BAR		22		26 BAR	
2. Tem. da máquina	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 165°C	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 187°C	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 210°C
	Z <sub>2</sub> : 170°C	Z <sub>4</sub> : 160°C	Z <sub>2</sub> : 195°C	Z <sub>4</sub> : 180°C	Z <sub>2</sub> : 220°C	Z <sub>4</sub> : 200°C

Conforme o procedimento experimental descrito por HILL & HUNTER (1966), a primeira etapa da metodologia de superfície de resposta é definir a técnica de planejamento que será utilizada para conduzir os experimentos industriais. Desta forma, para aplicar os conceitos sugeridos anteriormente, foi utilizado o planejamento fatorial  $2^2$ , com pontos centrais, apresentado na Tabela 3.14. Cada uma das combinações do experimento foi repetida cinco (5) vezes.

**TABELA 3.14 - EXPERIMENTO FATORIAL  $2^2$ , COM PONTOS CENTRAIS**

N Teste	FATORES		
	T. Máquina		P. Inj.
1	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 165°C	18
	Z <sub>2</sub> : 170°C	Z <sub>4</sub> : 160°C	
2	"		26
3	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 210°C	18
	Z <sub>2</sub> : 220°C	Z <sub>4</sub> : 200°C	
4	"		26
5	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 187°C	22
	Z <sub>2</sub> : 195°C	Z <sub>4</sub> : 180°C	
6	"		22
7	"		22
8	"		22
9	"		22



A seguir, serão descritas as etapas do procedimento experimental utilizado para conduzir os experimentos: cálculo dos coeficientes do modelo de aproximação (utilizando o método de mínimos quadrados), análise estatística do modelo (ANOVA), análise da superfície de resposta (gráficos de contorno bidimensionais e de superfície de resposta tridimensional) e análise canônica do modelo de ajustagem.

### 3.9.2 Análise de resultados

Depois de realizar os experimentos, os componentes plásticos foram avaliados pelos funcionários da empresa. Nesta etapa novamente foram utilizadas as escalas numéricas definidas para os primeiros experimentos. A média dos resultados obtidos para cada uma das características de qualidade e a soma quadrática dessas repostas (utilizando-se a eq. (3.1)), são apresentadas na Tabela 3.15.

**TABELA 3.15 - RESULTADO DO TERCEIRO EXPERIMENTO**

<b>N Teste</b>	<b>Falha Rebarba</b>	<b>Deformação</b>	<b>Dimensional</b>	<b>SQ</b>
1	-10	10	10	300,0
2	6	0,2	0,1	36,05
3	5,25	0,5	4,05	44,22
4	5,25	0,15	5,15	54,11
5	5	0	5	50,0
6	3,75	1	3,75	29,13
7	3,75	0,75	3,75	28,69
8	3,75	0,25	5	39,13
9	6,25	0,75	5	64,63

Com as informações da Tabela 3.15, e aplicando o método de mínimos quadrados (a resolução é apresentada no Anexo C), é determinado o modelo linear que se aproxima da superfície de resposta, conforme a eq. (3.2).

$$y = 71,70 - 59,43x_1 - 63,52x_2 + 70,50x_1x_2 \quad (3.2)$$

sendo que  $x_1$  é a temperatura da máquina e  $x_2$  é a pressão de injeção.

Na Tabela 3.16, é apresentado a análise de variância (ANOVA) para esse experimento. Usualmente o procedimento que é utilizado para rejeitar a hipótese nula é se  $F_0 > F_{k, (nc-1), \alpha}$ . Desta forma, comparando-se a estatística  $F_0$  com a estatística  $F$  crítica para um nível de significância de 1% ( $k = 1$  e  $n_c = 4$ ) pode-se afirmar que os dois fatores (T. Máquina e P. de Injeção) apresentam efeitos significativos. Isso demonstra que ao menos uma das variáveis do modelo contribui significativamente na aproximação da superfície. A rejeição da hipótese nula também é confirmada porque o valor  $p$  é menor que o nível de significância (valor  $p < \alpha$ ), portanto, o teste é significativo.

Ainda, no quadro de ANOVA, o teste de  $F$ , em um nível de significância de 1%, apresenta a existência de uma curvatura no plano da superfície de resposta, portanto, há evidências que a função não é linear. Ao mesmo tempo, a análise de variância demonstra que o efeito de interação dos fatores é significativo no modelo.

**TABELA 3.16 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP III,  $F_{0,01,1,4} = 21,20$**

Fonte de Variação	Soma Quadrado	<i>g.l.</i>	Quadrado Médio	$F_0$	valor $p$
Temperatura Máquina	14127,7	1	14127,7	44,17	2,6EXP-03
Pressão de Injeção	16136,62	1	16136,62	50,45	2,0EXP-03
Interação	18747,09	1	18747,09	58,62	1,5EXP-04
Curvatura do plano	10360,05	1	10360,05	32,39	4,7EXP-03
Resíduo	214,39	4	53,59		

Com esses resultados, conclui-se que o modelo de primeira ordem não satisfaz as condições de operação das três variáveis de interesse e, nesse caso deve-se partir para a construção de um modelo de ordem superior. Esse procedimento será descrito a seguir.

### 3.10 Realização do experimento: Quarta rodada

#### 3.10.1 Matriz de planejamento

Considerando as informações da análise estatística da terceira rodada, um novo experimento foi planejado. Nessa fase foi utilizada a técnica de planejamento composto central. Essa técnica consiste em acrescentar pontos axiais ao experimento fatorial  $2^2$ , com pontos centrais. Os pontos axiais são determinados pela eq. (3.3), e são utilizados para se garantir que em qualquer direção da superfície determinada (ponto máximo ou mínimo), a partir do ponto central (0, 0), as respostas do processo de moldagem plástica por injeção serão minimizadas. É importante ressaltar que outros algoritmos (FDOP, DETMAX) podem ser utilizados para planejar os experimentos (*optimal designs*), conforme apresentado por MYERS et al. (1989) e YONCHEV (1988).

$$\alpha_1 = (n_f)^{1/4} \quad (3.3)$$

sendo que  $n_f$  é o número de pontos utilizados do experimento fatorial  $2^2$ .

Utilizando-se os pontos do planejamento fatorial  $2^2$  se obtém  $\alpha_1 = \pm 1.414$ . Destaca-se que para transformar esses valores codificados em variáveis naturais foi utilizada a eq. (3.4).

$$x_i = \frac{(\xi_i - n_c)}{\Delta x_i} \quad (3.4)$$

sendo que  $\xi_i$  representa o nível da variável natural do processo de fabricação,  $n_c$  é o ponto central utilizado no experimento e  $\Delta x_i$  é o valor de escala ou o incremento na variável independente. Para o presente experimento, o incremento é de 25°C para a Temperatura da Máquina e 4 BAR para a Pressão de Injeção.

Na Tabela 3.17, são apresentados os níveis de ajustagem dos fatores de controle em termos de variáveis naturais, variáveis codificadas e a matriz de planejamento.

**TABELA 3.17 - EXPERIMENTO FATORIAL  $2^2$  COMPOSTO CENTRAL**

N Teste	FATORES DE CONTROLE			
	Variáveis codificadas		Variáveis naturais	
	$x_1$	$x_2$	Temperatura da Máquina	P. Injeção
1	-1	-1	Z <sub>1</sub> : 190°C Z <sub>2</sub> : 170°C	Z <sub>3</sub> : 165°C Z <sub>4</sub> : 160°C 18
2	-1	+1		" 26
3	+1	-1	Z <sub>1</sub> : 190°C Z <sub>2</sub> : 220°C	Z <sub>3</sub> : 210°C Z <sub>4</sub> : 200°C 18
4	+1	+1		" 26
5	0	0	Z <sub>1</sub> : 190°C Z <sub>2</sub> : 195°C	Z <sub>3</sub> : 187°C Z <sub>4</sub> : 180°C 22
6	0	0		" 22
7	0	0		" 22
8	0	0		" 22
9	0	0		" 22
10	+1.414	0	Z <sub>1</sub> : 190°C Z <sub>2</sub> : 230°C	Z <sub>3</sub> : 220°C Z <sub>4</sub> : 210°C 22
11	-1.414	0	Z <sub>1</sub> : 190°C Z <sub>2</sub> : 160°C	Z <sub>3</sub> : 155°C Z <sub>4</sub> : 150°C 22
12	0	+1.414	Z <sub>1</sub> : 190°C Z <sub>2</sub> : 195°C	Z <sub>3</sub> : 187°C Z <sub>4</sub> : 180°C 27
13	0	-1.414		" 16

Nesse experimento, as observações de 1 até 9 foram novamente realizadas pelos pesquisadores. Isso se tornou necessário porque o tempo transcorrido entre o Experimento III e IV foi excessivo. Porém, outra estratégia que poderia ser utilizada, nesse experimento era formar blocos no planejamento de superfície de resposta. O objetivo principal desse método é eliminar a influência de alguma variável estranha ou diferente das investigadas (MONTGOMERY, 1991).

### 3.10.2 Análise de resultados

Depois de realizar os experimentos, os componentes plásticos foram avaliados pelos funcionários da empresa. A média dos resultados obtidos para cada uma das características de qualidade e a soma quadrática dessas repostas são apresentadas na Tabela 3.18.

**TABELA 3.18 - RESULTADOS DO QUARTO EXPERIMENTO**

N Teste	Falha Rebarba	Deformação	Dimensional	SQ
1	-5,0	8,0	7,81	150,0
2	3,75	1,6	1,55	19,03
3	2,5	1,9	1,1	11,07
4	5,25	1,05	5,25	56,23
5	1,5	0,25	0,5	2,56
6	-1,25	2,75	2,75	16,69
7	3,75	0	1,75	17,13
8	-2,25	2,5	2,75	18,88
9	2,5	0	0,5	6,50
10	-4,5	3,7	3,8	48,38
11	-4	3,6	3,5	41,21
12	3,75	2,5	2,75	27,88
13	4,75	0,25	4,35	41,55

A Tabela 3.19 apresenta o quadro de ANOVA para esse experimento. Com essa análise novamente verifica-se que o modelo de primeira ordem (representado pela eq. (3.5)), não pode ser utilizado para ajustar os níveis ótimos do processo de moldagem plástica por injeção porque há fortes indícios que a interação entre os fatores provoca uma curvatura na superfície do sistema (estatística  $F_0 > F_{0,01, 1, 4}$  e valor  $p < \alpha$ ).

$$y = 33,09 - 25,43x_1 - 21,45x_2 + 42,50x_1x_2 \quad (3.5)$$

sendo que  $x_1$  é a temperatura da máquina e  $x_2$  é a pressão de injeção.

**TABELA 3.19 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP IV,  $F_{0,01, 1, 4} = 21,20$** 

Fonte de Variação	Soma Quadrado	g.l.	Quadrado Médio (QM)	$F_0$	valor p
Temperatura Máquina	2587,24	1	2587,24	48,27	2,2EXP-03
Pressão de Injeção	1840,84	1	1840,84	34,34	4,2EXP-03
Interação	7755,44	1	7755,44	144,69	2,7EXP-04
Curvatura do plano	4852,75	1	4852,75	90,54	6.8EXP-04
Resíduo	214,39	4	53,59		

Sendo assim, utilizando-se o método de mínimos quadrados e a soma quadrática das respostas do experimento, apresentadas na Tabela 3.18, é construído o modelo ajustado (ver o Anexo D) para a superfície de resposta das características de qualidade consideradas, conforme eq. (3.6).

$$y = 12,35 - 11,45 x_1 - 13,14 x_2 + 20,8 x_1^2 + 15,69 x_2^2 + 44,033 x_1 x_2 \quad (3.6)$$

sendo que  $x_1$  é a temperatura da máquina e  $x_2$  é a pressão de injeção.

Na Tabela 3.20, é apresentada a análise de variância para esse modelo matemático. O teste  $F_0$ , em um nível de significância de 1%, aponta que a falta de ajuste do ponto central e do ponto axial não é significativa na superfície de resposta.

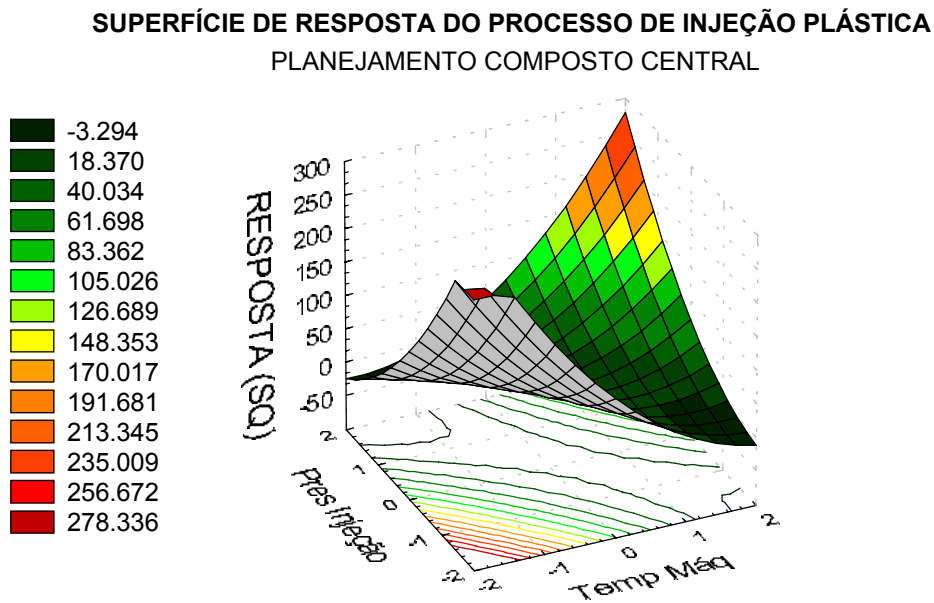
Ainda que o teste  $F_0$  realizado nos coeficientes não quadráticos demonstre que são poucos significativos, optou-se por analisar o modelo completo. Assim, os resultados da ANOVA também apontam que os termos quadráticos puros não são significativos. Porém, a estatística  $F_0$  demonstra, em um nível de significância de 1%, que o coeficiente quadrático misto (T. Máquina x P. Injeção) do modelo tem um efeito médio significativo na resposta.

**TABELA 3.20 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA - EXP IV,  $F_{0,01,1;4} = 21,20$**

Fonte de variação	Soma Quadrado	Gl	Quadrado Médio	$F_0$	valor p
Ponto Central x Ponto Axial	344,471	1	344,47	0,65	0,44
Temperatura Máquina	1150,79	1	1150,79	2,18	0,19
Pressão Injeção	848,673	1	848,673	1,60	0,25
(Temperatura Máquina) <sup>2</sup>	2917,502	1	2917,50	5,53	0,05
(Pressão Injeção) <sup>2</sup>	1661,114	1	1661,11	3,14	0,12
T. Máquina x Pres Inj	7755,44	1	7755,44	14,70	8,0EXP-03
Resíduo	3164,781	6	527,463		

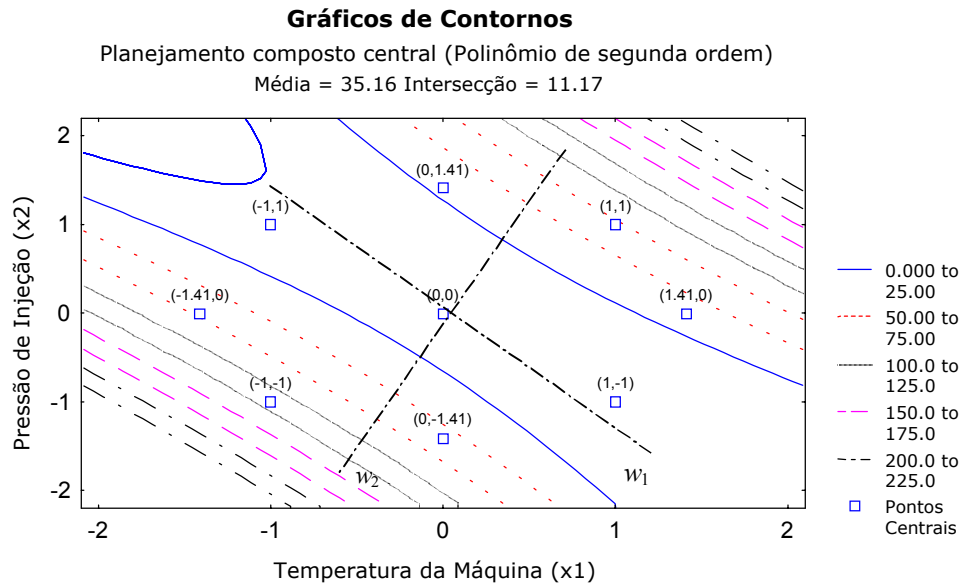
No entanto, pela análise de variância pode-se afirmar que o modelo matemático (eq. (3.6)) pode ser utilizado para ajustar as condições ótimas de operação do processo de moldagem plástica por injeção. Porém, antes de determinar os melhores níveis de regulação do processo, será realizada uma análise de superfície de resposta, conforme segue.

A Figura 3.14, representa a superfície de resposta tridimensional gerada a partir do modelo ajustado. No gráfico, observa-se que as combinações dos parâmetros nos níveis máximos ou mínimos influenciam fortemente o resultado da função resposta, ou seja o deslocamento nas direções de máxima ascendente ou mínima descendente provoca um incremento adicional na resposta. Porém, pelos resultados apresentados no gráfico, principalmente quando a função varia no intervalo de 0 e 25 (soma quadrática das respostas), percebe-se que existem alguns pontos próximos as condições ótimas do processo de moldagem plástica por injeção que minimizam a função resposta.



**FIGURA 3.14 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

A Figura 3.15, corresponde aos contornos bidimensionais gerados a partir do modelo ajustado. Nessa figura observa-se que o ponto estacionário ( $x_0$ ) é um ponto de sela (*minimax*). Isto refuta a hipótese que no espaço formado pelos eixos ( $x_1, x_2$ ), apenas um ponto minimiza a função resposta. Devido a esse fato, é necessário investigar os pontos próximos ao ponto estacionário nas direções dos eixos ( $w_1, w_2$ ). Esse procedimento é conhecido como análise canônica, conforme será abordado a seguir.



**FIGURA 3.15** - GRÁFICO DE CONTORNOS: PRESSÃO INJEÇÃO x TEMP MÁQUINA

### 3.10.2.1 Análise canônica de superfície de resposta

O método utilizado para resolver o problema foi descrito com mais detalhes no capítulo 2. Ainda, recomenda-se consultar a literatura de experimentos industriais (MYERS & MONTGOMERY, 1995; MONTGOMERY, 1991; BOX & DRAPER, 1987; BOX & HUNTER, 1957; COCHRAN & COX, 1957).

O primeiro passo para transformar o modelo ajustado para um modelo canônico é determinar o ponto estacionário ( $x_0$ ) do processo de fabricação (ver Anexo E) e a resposta do modelo ajustado nesse ponto. Os níveis dos fatores de controle ( $x_0$ ) e as resposta do modelo ajustado nesse ponto são apresentados na Tabela 3.21.

**TABELA 3.21** - PONTO ESTACIONÁRIO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Ponto estacionário		Variáveis naturais		Resposta ( $y_0$ )
$x_1$	$x_2$	T. Máquina	P. Inj.	
0,34	-0,07	Z <sub>1</sub> : 190°C Z <sub>2</sub> : 203°C	Z <sub>3</sub> : 195°C Z <sub>4</sub> : 188°C	21 BAR 11



Em seguida, utilizando-se os coeficientes quadráticos puros e mistos do polinômio de segunda ordem é construída a eq. (3.7). As raízes dessa equação são  $\lambda_1 = -3,89$  e  $\lambda_2 = 40,41$ . Portanto, a forma canônica do modelo ajustado será conforme a eq. (3.8).

$$[\mathbf{B}-\lambda\mathbf{I}] = \lambda^2 - 36,52\lambda - 157,617 = 0 \quad (3.7)$$

sendo que  $\mathbf{B}$  é a matriz dos coeficientes do modelo ajustado e  $\lambda$  representa as raízes do modelo canônico.

$$y = 10,93 - 3,89 w_1^2 + 40,41 w_2^2 \quad (3.8)$$

Na eq. (3.8), observa-se que os sinais das raízes são opostos. Isto demonstra que o ponto estacionário ( $\mathbf{x}_0$ ) é um ponto de sela, conforme descrito pela Figura 3.15. Ainda, comparando os valores das raízes, percebe-se que a pendente da superfície de resposta na direção do eixo  $w_1$  tende a ser mais atenuada. Portanto, uma investigação mais detalhada nessa direção torna-se necessária.

Nessa etapa do procedimento de análise estatística, são construídas as equações matemáticas que descrevem o relacionamento entre as variáveis independentes ( $x_1, x_2$ ) e as variáveis do espaço  $w_i$ . Assim, partindo-se da eq. (3.9), proposta por MONTGOMERY (1991) e BOX & HUNTER (1957), determina-se a eq. (3.10).

$$w = \mathbf{M}'*(\mathbf{x}-\mathbf{x}_0); \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \beta_1^2 - \lambda_i & \beta_{12}/2 \\ \beta_{12}/2 & \beta_2^2 - \lambda_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = 0; \mathbf{x} = (x_1, x_2) \quad (3.9)$$

sendo que  $\mathbf{M}'$  é uma matriz com os elementos normalizados ( $m_{ii}, m_{ij}$ ),  $\beta_i$  são os coeficientes do modelo ajustado e  $\lambda_i$  são as raízes do modelo canônico.

$$w_1 = -0,664x_1 + 0,746x_2 + 0,27 \quad (3.10)$$

$$w_2 = 0,747x_1 + 0,664x_2 - 0,21$$

sendo que  $x_1$  é a temperatura da máquina e  $x_2$  é a pressão de injeção.

Com essas equações são determinados as coordenadas ( $w_1, w_2$ ) dos pontos (ou a faixa de valores) que satisfazem as condições ótimas de operação do processo de fabricação. Ao mesmo tempo, são utilizadas para transformar esses níveis no espaço formado pelos fatores experimentais ( $x_1, x_2$ ).

Como o método utilizado é para determinar ou explorar os valores que otimizam a função resposta na direção  $w_1$ , será considerado que o deslocamento na direção  $w_2$  é igual a zero. É importante ressaltar que a análise de superfície de resposta é realizada só na direção  $w_1$  porque o modelo canônico (demonstra que as repostas serão fortemente influenciadas pelo coeficiente que multiplica  $w_2$ ), e os gráficos de superfície de resposta demonstraram que na direção  $w_2$  a função resposta será maximizada, ou seja pela análise comprova-se que quando o processo é regulado em algum ponto dessa direção as características de qualidade investigadas no experimento tendem a piorar.

A resolução do modelo canônico (eq. (3.8)) para uma função resposta otimizada (variação próxima de zero), demonstra que as raízes na direção  $w_1$  são iguais a  $\pm 1.66$ . Desta, forma, substituindo os pontos  $(+1.66, 0)$ ,  $(-1.66, 0)$  nas equações (3.10), é determinada a faixa de valores que minimizam a função resposta no espaço formado pelos eixos  $x_1$  e  $x_2$ . Os níveis codificados ( $x_1, x_2$ ) dos fatores experimentais são apresentados na Tabela 3.22. Esses valores foram transformados para as variáveis naturais por meio da eq. (3.4). Nessa mesma tabela percebe-se que os valores obtidos com a metodologia de superfície de resposta são condizentes com os respectivos valores que a empresa utiliza para ajustar o processo de injeção plástica.

**TABELA 3.22 - NÍVEIS ÓTIMOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO**

Fatores	$(w_1, w_2)$	$(+1.66, 0)$	Ponto Estacionário		$(-1.66, 0)$		Ponto usado pela empresa	
	$(x_1, x_2)$	$(-0.76, 1.16)$	$(0.34, -0.06)$		$(1.4, -1.3)$			
T. Máq	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 168°C	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 195°C	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 223°C	Z <sub>1</sub> : 190°C	Z <sub>3</sub> : 175°C
	Z <sub>2</sub> : 176°C	Z <sub>4</sub> : 161°C	Z <sub>2</sub> : 203°C	Z <sub>4</sub> : 188°C	Z <sub>2</sub> : 231°C	Z <sub>4</sub> : 216°C	Z <sub>2</sub> : 180°C	Z <sub>4</sub> : 170°C
P. Inj	24 BAR		21 BAR		16 BAR		20 BAR	

Em seguida, substituindo os valores codificados, apresentados na Tabela 3.21, no modelo ajustado (eq. (3.6)) pode-se concluir que a função resposta varia em um intervalo de 0 a 11 (a resposta é próximo de zero para a combinação dos níveis (-0.76, 1.16); (1.4, -1.3) e onze (11) no ponto estacionário (0.34, -0.06)), que é considerado satisfatório pelo controle de qualidade do processo na empresa.

Nesta fase final dos ensaios seria necessário realizar um experimento de confirmação dos resultados. Porém, considerando-se as normas de segurança que a empresa define para regular o processo, ou seja “...evitar utilizar níveis elevados de temperatura da máquina porque reduzem a vida útil do cilindro de deslocamento da máquina e alteram as propriedades químicas do material.. por outro lado, as temperaturas baixas não conseguem aquecer o material e conseqüentemente o atrito nas paredes do cilindro é maior...”, recomenda-se que os níveis da faixa de variação: (-0.76, 1.16); (1.4, -1.3) devem ser evitados na regulagem do processo de fabricação.

Para validar o ponto estacionário, foi realizado um teste e os resultados são apresentados na Tabela 3.23. Nesse experimento, os outros fatores investigados no projeto, Temperatura do Molde, Tempo de Resfriamento, Velocidade de Injeção e Tempo de Injeção, continuaram sendo regulados com os mesmos níveis que a empresa determinou na primeira etapa do procedimento experimental (Tabela 3.1).

**TABELA 3.23 - CONFIRMAÇÃO DO PONTO ESTACIONÁRIO**

TEMPERATURA MÁQUINA	PRESSÃO INJEÇÃO	RESULTADO (média)			SQ
		F/R	DEF	DIM	
Z <sub>1:Bico</sub> = 190°C    Z <sub>3</sub> = 195°C Z <sub>2</sub> = 203°C    Z <sub>4</sub> = 188°C	21 BAR	0,75	0,6	0,45	1.2

Comparando-se o resultado da função quadrática, apresentado na Tabela 3.23, com o resultado do modelo ajustado (variação próxima de 11) a equipe responsável por conduzir os experimentos confirma que esses níveis podem ser definidos como as condições ótimas do processo de moldagem plástica por injeção.

### **3.11 Considerações finais dos experimentos**

Neste capítulo foram descritas quatro rodadas de experimentos. Tornou-se evidente que dos seis fatores de controle que foram considerados na fase inicial do procedimento experimental (Temperatura da Máquina, Tempo de Injeção, Velocidade de Injeção, Tempo de Resfriamento, Pressão de Injeção e Temperatura do Molde), apenas dois parâmetros são os que mais influenciam as respostas do processo de moldagem plástica por injeção (Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção). Com a identificação das principais variáveis foi possível utilizar um procedimento de otimização (metodologia de superfície de resposta).

Com esse método foi possível modelar e acompanhar a variação da função resposta, quando os níveis dos parâmetros que regulam o processo de injeção plástica foram alterados. A análise estatística (ou canônica do modelo de ajustagem) dos resultados experimentais permitiu determinar as condições ótimas do processo de fabricação.

## 4 CONCLUSÃO

### 4.1 Conclusão

O objetivo geral deste trabalho foi estudar e aplicar as técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade industrial. Como parte deste objetivo, foram realizados experimentos industriais com as técnicas de planejamento Fatorial Fracionado  $2^{k-p}$ , Análise de Variância e Metodologia de Superfície de Resposta na melhoria da qualidade de um processo de moldagem por injeção plástica.

Com o estudo do processo de injeção plástica (neste caso, a resina termoplástica utilizada é o Polipropileno (PP)), foram identificados os parâmetros de controle do processo que mais ocasionam problemas de qualidade, assim como pôde-se determinar os melhores valores ou níveis de ajustagem dos fatores para minimizar os problemas.

Ainda, com a pesquisa experimental, foi possível apresentar uma metodologia de planejamento de experimentos industriais aos funcionários de uma empresa. Esse aspecto certamente motiva as pessoas a desenvolver os projetos de produtos ou processos de fabricação com mais eficiência e eficácia. Pôde-se perceber por meio dos relatos da equipe responsável por acompanhar os ensaios que o projeto foi considerado como um bom exemplo para a implantação de metodologias de planejamento e análise estatística.

Além disso, foi possível desenvolver uma pesquisa onde várias características de qualidade são analisadas simultaneamente. Isso, é um ponto importante do projeto porque na maioria dos estudos que são publicados na literatura de experimentos industriais, observa-se que as respostas são analisadas individualmente.

No processo de implantação, foi possível demonstrar para os funcionários

que as características de qualidade do produto podem ser melhoradas, o processo de fabricação pode ser controlado, é possível reduzir o número de peças com defeito e conseqüentemente o re-trabalho (moer as peças defeituosas). Outros benefícios alcançados com a implantação das técnicas de planejamento e análise de experimentos são discutidos a seguir.

Primeiramente, com o projeto, pôde-se mostrar aos responsáveis pela engenharia do processo que, diferentemente do que eles afirmavam, nem todos os fatores de ajustagem, inicialmente considerados, afetam a qualidade do resultado do processo de fabricação. Ou seja, para as faixas de ajustagem consideradas, apenas dois fatores (Pressão de Injeção e Temperatura da Máquina) apresentaram um efeito significativo sobre as características de qualidade do componente. Para os outros fatores, pode-se afirmar que não existe necessidade de se definir, na ficha técnica, um valor específico de ajustagem da máquina, mas sim uma faixa de valores, dentro da qual o processo terá bom desempenho.

Ainda que a influência dos fatores de controle Temperatura da Máquina e Pressão de Injeção possa parecer óbvia para as pessoas que operam o processo de fabricação no dia-a-dia, aqui ela pôde ser quantificada, podendo-se a partir disso estimar possíveis ganhos a serem obtidos com o controle dos fatores considerados.

O procedimento de otimização utilizado para estabelecer as condições ótimas do processo de injeção plástica foi bastante explorado e descrito para os funcionários da empresa. Os resultados motivaram as pessoas a usar as ferramentas estatísticas para melhorar a qualidade de outros produtos e processos de fabricação.

Entretanto, os conceitos apresentados aos funcionários ainda estão sendo pouco utilizados, portanto ações que provoquem o uso dessas técnicas são necessárias. Algumas recomendações que ajudam nesse processo podem ser citadas, conforme segue:

- Selecionar outros produtos que são críticos na empresa e que podem ser melhorados com um projeto experimental;
- Identificar outros processos de fabricação que freqüentemente apresentam problemas de qualidade;

- Motivar as pessoas a confiar nas inferências estatísticas, realizadas pela equipe responsável por conduzir os experimentos industriais;
- Divulgar e discutir os relatórios de cada uma das fases do procedimento ou estratégia experimental utilizada;
- Incentivar o uso de *softwares* estatísticos;
- Destacar que o tempo necessário para realizar os experimentos é pequeno e que os custos experimentais são baixos se comparados ao procedimento que a empresa adota para definir a faixa de regulação dos fatores de controle;
- Aplicar as técnicas de planejamento e análise de experimentos na fase de desenvolvimento de produtos. Esse aspecto é importante porque a pesquisa estava focalizada no processo de fabricação e nessa etapa algumas vezes as mudanças ou ações de melhoria se tornam economicamente inviáveis para as empresas;
- Informar que o projeto experimental é de grande importância para o direcionamento e otimização dos experimentos. O planejamento e a análise dos resultados certamente proporciona produtos de melhor qualidade. Assim como, processos de fabricação mais robustos, visto que os níveis dos parâmetros do processo são investigados e determinados estatisticamente. Outro benefício é que se garante o atendimento dos prazos de entrega dos produtos, além da satisfação da equipe de projeto.

Ao longo da pesquisa experimental também foram verificadas algumas dificuldades. No que se refere à aplicação, na fase inicial de desenvolvimento do projeto, os funcionários desconheciam as técnicas de planejamento e esse aspecto, algumas vezes, limitava o desenvolvimento da proposta na empresa. No entanto, acredita-se que na fase final da pesquisa essa barreira foi superada e que nos próximos projetos experimentais desenvolvidos pela empresa, esta limitação será

eliminada completamente.

Outra dificuldade está relacionada a escolha dos fatores de controle investigados com as técnicas experimentais. Algumas pesquisas realizadas com o mesmo processo de injeção plástica demonstraram que outros fatores podem influenciar o desempenho (ACHARYA & MAHESH, 1999; NISHINA et al., 1998; ENGEL & HUELE, 1996 e MONTGOMERY, 1991). Isso comprova que os resultados da aplicação do procedimento de otimização utilizado neste projeto são específicos ao componente plástico (projeto do molde utilizado) e matéria-prima (polímero Polipropileno) utilizado para realizar os experimentos industriais.

Ainda, deve-se observar que na fase inicial de experimentação a faixa de operação dos parâmetros foi estabelecida conforme a experiência dos funcionários. Quando os ensaios foram realizados com esses níveis, vários problemas ocorreram com o equipamento de injeção. Considerando esse ponto e outros aspectos (ex. falta de experiência com as técnicas de planejamento e análise de experimentos e de conhecimento do processo de injeção plástica), os pesquisadores, com o primeiro experimento, não conseguiram concluir com segurança sobre os fatores que realmente influenciavam as características de qualidade do processo de injeção plástica. Entretanto, pode-se perceber que pela falta de procedimentos e técnicas adequadas na definição dos níveis, o processo de fabricação estava perdendo produtividade, gerando refugo e baixa qualidade, aumentando os custos de produção. Essas questões demonstram a necessidade de utilizar as ferramentas estatísticas e realizar novos experimentos.

Finalmente, um resultado bastante importante deste trabalho foi o de mostrar às pessoas envolvidas no estudo a validade de analisar cientificamente o processo de transformação e, com isso não só fomentar o uso dessas técnicas junto à empresa em questão, mas também promover a aproximação universidade-empresa. Com essa integração foi possível criar um processo de aprendizagem. Isto é, a medida que os experimentos eram realizados os pesquisadores foram adquirindo informações técnicas do processo de fabricação e os funcionários da empresa foram se familiarizando com os conceitos de delineamento de experimentos.



## 4.2 Sugestões de trabalhos futuros

Apesar da disciplina “Planejamento e Análise de Experimentos” estar incluída na maioria dos cursos de engenharia das universidades brasileiras, percebe-se que nas empresas poucas pessoas utilizam tais conceitos para investigar os problemas de qualidade dos produtos ou processos de fabricação. Portanto, torna-se necessário investigar com mais detalhes quais são os principais motivos dessa resistência. A identificação das causas certamente permitirá elaborar um plano de ações que elimine essa deficiência na indústria nacional, assim como motivará as pessoas de outros setores a usar as técnicas de experimentação.

No projeto foram utilizadas as técnicas de Planejamento Fatorial e Análise de Variância para realizar e analisar estatisticamente os ensaios. Porém, na literatura de projetos experimentais existem outras técnicas experimentais (ex. método Taguchi, algoritmos de planejamento ótimos) que podem ser aplicadas em conjunto com os procedimentos de ajustagem de superfície de resposta descritos anteriormente. Outra sugestão, é a utilização de uma nova função de perda quadrática (REDDY et al., 1998; GUEDES, 1996; ELSAYED & CHEN, 1993; TAGUCHI, 1993).

As análises de resultados demonstraram quais eram os principais fatores de controle e os níveis ótimos que satisfazem as condições de operação do processo de injeção plástica. No entanto, para uma análise mais completa do processo recomenda-se que novos experimentos sejam realizados. Neste caso, para estudar o comportamento ou a variação da função resposta podem ser selecionados outros parâmetros e faixas de operação.

Ainda, com o objetivo de determinar os melhores níveis de regulagens do processo ou desenvolver produtos mais robustos, sugere-se que novas pesquisas sejam realizadas com as técnicas de planejamento e análise de experimentos em outros processos de transformação de resinas termoplásticas. Ao mesmo tempo, recomenda-se que outras ferramentas de qualidade sejam integradas ao projeto de experimentos.

## **ANEXOS**

**Anexo A** - Método para estimar os parâmetros dos modelos matemáticos

**Anexo B** - Carta de apresentação

**Anexo C** - Resolução do modelo de primeira ordem

**Anexo D** - Resolução do modelo de segunda ordem

**Anexo E** - Cálculo do ponto estacionário do processo de fabricação

### Anexo A - Método para estimar os parâmetros dos modelos matemáticos

O método de mínimos quadrados é utilizado para estimar os coeficientes ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ) dos polinômios usados na modelagem de resposta. Qualquer um dos modelos matemáticos pode ser resolvido por meio de uma dedução matricial, conforme será descrito a seguir. O procedimento é baseado nos conceitos apresentados pela literatura de projetos experimentais (GUEDES, 1996; MYERS & MONTGOMERY, 1995; HILL & HUNTER, 1996; MONTGOMERY, 1991 e COCHRAN & COX, 1957).

A eq. (1) representa a forma matricial de um polinômio de  $n$  observações disponíveis ( $n$  representa os pares de informações  $(y_1, x_1), (y_2, x_2), (y_3, x_3), (y_4, x_4) \dots, (y_n, x_n)$ ).

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (1)$$

sendo que,

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Nesse caso,  $Y$  é um vetor das respostas observadas ( $n \times 1$ ),  $X$  é uma matriz ( $n \times p$ ) formada pelos fatores experimentais,  $\beta$  é o vetor dos coeficientes ( $p \times 1$ ) e  $\varepsilon$  é um vetor que representa os erros aleatórios dos experimentos ( $n \times 1$ ), que devem seguir, aproximadamente, a distribuição de probabilidade normal com média zero e variância  $\sigma^2 I$ ,  $N(0, \sigma^2 I)$ .  $I$  é uma matriz identidade de ( $n \times n$ ) e  $\sigma^2$  é um constante (BOX & HUNTER, 1957). O objetivo principal de resolver as equações normais por meio de matrizes é determinar os vetores  $\beta$  que minimizam a função de mínimos quadrados. Essa função é dada pela eq. (2).

$$L = y'y - \beta'X'y - y'X\beta + \beta'X'X\beta \quad (2)$$

sendo que, o termo  $\beta'X'y$  é uma matriz ( $1 \times 1$ ) ou um escalar, e sua derivada é dada por  $(\beta'X'y)' = y'X\beta$ .

Assim, a solução geral da eq. (2) é dada pela eq. (3).

$$L = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (3)$$

A derivada da função de mínimos quadrados (L) em relação aos elementos do vetor  $\beta$  igualada a zero é dada pela eq. (4).

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right| = -2X'y + 2X'X\hat{\beta} = 0, \text{ o que significa que: } X'X\hat{\beta} = X'y$$

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (4)$$

A eq. (4), também pode ser representada com mais detalhes pela forma matricial, conforme segue:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad X'X = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ik} \\ \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ik} & \sum_{i=1}^n X_{ik}X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{ik}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ik}^2 \end{bmatrix} \quad X'y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{i1}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ik}y_i \end{bmatrix}$$

sendo que, a expressão  $X'X$  é uma matriz simétrica ( $p \times p$ ), que é influenciada pelo modelo matemático e pelo planejamento experimental. A estrutura da matriz  $X'X$  é definida como:  $n$  corresponde ao número de experimentos realizados, a diagonal corresponde a soma dos quadrados das colunas  $X$  e os elementos fora da diagonal corresponde aos produtos cruzados das colunas  $X$ , e  $X'y$  é um vetor da coluna ( $p \times 1$ ).

Outra alternativa que pode ser utilizada para resolver os polinômios por meio do método de mínimos quadrados é apresentada por LEVINE et al. (1998). Os autores determinam os coeficientes por meio do software de planilhas EXCEL. Certamente, utilizando-se as ferramentas do programa, os coeficientes são determinados com mais facilidade pela equipe responsável por conduzir os experimentos industriais.

**Anexo B - Carta de apresentação****UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

*Departamento de Engenharia de Produção*

São Carlos, 27 de Março de 2000

Prezado Senhor:

Este primeiro contato tem por objetivo propor o desenvolvimento de um trabalho de parceria entre a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo e a sua empresa.

O trabalho refere-se à aplicação de conceitos e técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos para a melhoria da qualidade de produto e processo.

A abordagem tradicional para realizar experimento de engenharia concentra-se na resolução de problemas e análise de falhas, usualmente tentando isolar e estudar uma causa de cada vez, na base de tentativa e erro. Isto acarreta alto custo, consome muito tempo, e os resultados obtidos com a experimentação podem levar à conclusões erradas. Portanto, o que se propõe é aplicar as técnicas de planejamento de experimentação para o estudo simultâneo e combinado dos fatores que possam causar falhas ou perda da qualidade, e análise estatística dos resultados.

O trabalho seria desenvolvido pelo Eng. Edwin Vladimir Cardoza Galdámez, aluno do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos, como projeto de sua pesquisa para a dissertação de mestrado.

A definição da proposta de trabalho deve ser feita de acordo com os interesses da empresa.

Teremos o maior prazer em fazer uma exposição detalhada da nossa proposta de trabalho, caso haja interesse de sua empresa.

Em breve, estaremos entrando em contato telefônico para sabermos do interesse de sua empresa em darmos continuidade a esta proposta.

Sem mais para o momento, agradecemos a atenção desejada, e nos colocamos à disposição para contatos futuros.

Cordialmente,

---

Prof. Luiz C. R. Carpinetti  
(Orientador)

---

Edwin V. C. Galdámez  
(Mestrando)

### Anexo C - Resolução do modelo de primeira ordem

Nessa fase do experimento foi utilizado o método de mínimos quadrados:

$$\beta = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y}$$

sendo que  $\beta$  é a matriz com os coeficientes ( $\beta_i$ ),  $\mathbf{X}$  é matriz com os parâmetros normalizados e  $\mathbf{y}$  é a resposta experimental, conforme segue:

$\mathbf{X}$				$\mathbf{y}$
1	-1	-1	1	300
1	-1	1	-1	36,05
1	1	-1	-1	44,22
1	1	1	1	54,11
1	0	0	0	50
1	0	0	0	29,13
1	0	0	0	28,69
1	0	0	0	39,13
1	0	0	0	64,63

$\mathbf{X}'$								
1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	-1	1	1	0	0	0	0	0
-1	1	-1	1	0	0	0	0	0
1	-1	-1	1	0	0	0	0	0

$\mathbf{X}'\mathbf{X}$				$\mathbf{X}'\mathbf{y}$
9	0	0	0	646,0
0	4	0	0	-237,72
0	0	4	0	-254,06
0	0	0	4	282,01

$(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$				$\beta=(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y}$
0,111	0	0	0	71,70
0	0,250	0	0	-59,430
0	0	0,250	0	-63,515
0	0	0	0,250	70,503

determina-se o polinômio de primeira ordem:

$$y = 71,70 - 59,43x_1 - 63,52x_2 + 70,50x_1x_2$$

sendo que  $x_1$  é a temperatura da máquina e  $x_2$  a pressão de injeção.

### Anexo D - Resolução do modelo de segunda ordem

Nessa fase do experimento foi utilizado o método de mínimos quadrados:

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y$$

sendo que  $\beta$  é a matriz com os coeficientes ( $\beta_i$ ),  $X$  é matriz com os parâmetros normalizados e  $y$  é a resposta experimental, conforme segue:

X						y
$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$\beta_{12}$	
1	-1	-1	1	1	1	150
1	-1	1	1	1	-1	19,03
1	1	-1	1	1	-1	11,07
1	1	1	1	1	1	56,23
1	0	0	0	0	0	2,56
1	0	0	0	0	0	16,69
1	0	0	0	0	0	17,13
1	0	0	0	0	0	18,88
1	0	0	0	0	0	6,5
1	1,414	0	2	0	0	48,38
1	-1,414	0	2	0	0	41,21
1	0	1,414	0	2	0	27,88
1	0	-1,414	0	2	0	41,55

X'												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	1,414	-1,414	0	0
-1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	1,414	-1,414
1	1	1	1	0	0	0	0	0	2	2	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2
1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

X'X						X'y
13	0	0	8	8	0	457,11
0	8	0	0	0	0	-91,59
0	0	8	0	0	0	-105,14
8	0	0	12	4	0	415,51
8	0	0	4	12	0	375,19
0	0	0	0	0	4	176,13

$(X'X)^{-1}$						$\beta_i=(X'X)^{-1}*X'y$
0,2	0	0	-0,1	-0,1	0	12,35
0	0,125	0	0	0	0	-11,45
0	0	0,125	0	0	0	-13,14
-0,1	0	0	0,144	0,019	0	20,83
-0,1	0	0	0,019	0,144	0	15,69
0	0	0	0	0	0,250	44,033

determina-se o polinômio de segunda ordem:

$$y = 12,35 - 11,45 x_1 - 13,14 x_2 + 20,8 x_1^2 + 15,69 x_2^2 + 44,033 x_1 x_2$$

sendo que  $x_1$  é a temperatura da máquina  $x_1$  e  $x_2$  a pressão de injeção.

### Anexo E - Cálculo do ponto estacionário do processo de fabricação

Com o polinômio de segunda ordem e utilizando a eq. (1), se determina o ponto estacionário do processo de moldagem plástica por injeção.

$$\mathbf{x}_0 = -\frac{1}{2} * \mathbf{B}^{-1} * \mathbf{b} \quad (1)$$

sendo que  $\mathbf{B}$  é uma matriz formada pelos coeficientes quadráticos puros (diagonal) e pelo valor médio dos coeficientes quadráticos mistos (fora da diagonal) e  $\mathbf{b}$  é a matriz formada pelos coeficientes lineares do polinômio de segunda ordem.

$\mathbf{b}$	$\mathbf{B}$
-11,45	20,83    22,01
-13,14	22,01    15,69

Resolvendo-se a eq. (1) o ponto estacionário do processo é  $(x_1, x_2)$ :

$$\mathbf{x}_0 = (0,34, -0,06)$$

A eq. (2) pode ser utilizada para transformar os valores codificados do ponto estacionário em níveis de regulagens do processo de moldagem plástica por injeção.

$$x_i = \frac{(\xi_i - n_c)}{\Delta x_i} \quad (2)$$

sendo que  $\xi_i$  é representa o nível da variável natural do processo de fabricação,  $n_c$  é o ponto central utilizado no experimento e  $\Delta x_i$  é o valor de escala ou o incremento na variável independente, conforme segue:

- Temperatura da máquina ( $x_1$ ):

$$0,34 = \frac{\xi_1 - \frac{z_1 = 190 \text{ °C} \quad z_3 = 187 \text{ °C}}{z_2 = 195 \text{ °C} \quad z_4 = 180 \text{ °C}}}{25 \text{ °C}} \Rightarrow \xi_1 = \frac{z_1 = 190 \text{ °C} \quad z_3 = 195 \text{ °C}}{z_2 = 203 \text{ °C} \quad z_4 = 188 \text{ °C}}$$

- Pressão de injeção ( $x_2$ ):

$$-0,06 = (\xi_2 - 22) / 4 \Rightarrow \xi_2 = 21 \text{ BAR}$$



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAM, B.; CHIPMAN, H.; VIJAYAN, K. (1999). Some risks in the construction and analysis of supersaturated designs. *Technometrics*, v.41, n.2, p.135-141, May.
- ACHARYA, U.H.; MAHESH, C. (1999). Winning back the customer's confidence: a case study on the application of design of experiments to an injection-molding process. *Quality Engineering*, v.3, n.11, p.357-363.
- ANDERSON, R.L. (1957). Complete factorials, fractional factorials and confounding. CHEW, V. *Experimental design in industry*. New York, John Wiley & Sons, Inc. p.59-107.
- ANNUAL QUALITY CONGRESS. (2000). *Foresight XXI*. <http://www.asq.org>. (10 Jun.).
- ANTONY, J.; KATE, M.; FRANGO, A. (1998). A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques. *The TQM Magazine*, v.10, n.3, p.169-176.
- BARKER, T.B. (1985). *Quality by experimental design*. New York, Marcel Dekker; Milwaukee: ASQC Quality Press. Cap.1-2, p.1-22.
- BOWER, J.A. (1997). Statistics for food science V: comparison of many groups (part A). *Nutrition & Food Science*, n.2, p.78-84, Mar./Apr.
- BOX, G.E.P.; BISGAARD, S. (1987). The scientific context of quality improvement. *Quality Progress*, v.20, n.6, p.54-61, Jun.
- BOX, G.E.P.; DRAPER, N.R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. New York, Wiley. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics).
- BOX, G.E.P.; HUNTER, J.S. (1957). Experimental design for the exploration and exploitation of response surfaces. CHEW, V. *Experimental design in industry*. New York, John Wiley & Sons, Inc., p.138-190.
- BOX, G.E.P.; LIU, P.Y.T. (1999). Statistics as a catalyst to learning by scientific method part I-an example. *Journal of Quality Technology*, v.31, n.1, p.1-15, Jan.
- BUTTON, S.T. (2001). *Metodologia para planejamento experimental e análise de*

- resultado*. São Paulo, Universidade Estadual de Campinas. /Apostila/
- BYRNE, D.M.; TAGUCHI, S. (1987). The Taguchi approach to parameter design. *Quality Progress*, v.20, n.12, p.19-26, Dec.
- CARPINETTI, L.C.R. (2000). *Planejamento e análise de experimentos*. São Carlos, EESC/USP. /Apostila/
- COCHRAN, W.G.; COX, G.M. (1957). *Experimental designs*. 2.ed. London, John Wiley.
- COLEMAN, D.E.; MONTGOMERY, D.C. (1993). A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*, v.35, n.1, p.1-12, Feb.
- COMINATTO, A.C. (1990). *Manual prático de funcionamento I 17*. São Paulo, ASTRA S/A Indústria e Comércio. /Apostila/
- COMINATTO, A.C. (1997). *Influências das variáveis do ciclo no produto final*. São Paulo, ASTRA S/A Indústria e Comércio. /Apostila/
- CRUZ, C.H.B.; FRAGNITO, H.L.; COSTA, I.F.; MELLO, B.A. (1997). *Guia para física experimental, caderno de laboratório, gráficos e erros*. Campinas, UNICAMP. /Apostila/
- CHEN, Y.M.; LIU, J.J. (1999). Cost-effective design for injection molding. *Robotics computer integrate manufacturing*, n.15, p.1-21.
- CHEW, V. (1957). *Experimental designs in industry*. New York, John Wiley & Sons, Inc. p.1-58.
- DANE, F.C. (1990). *Research methods*. California, Brooks/Cole. Cap. 1-2.
- DEVOR, R.E.; CHANG, T.; SUTHERLAND, J.W. (1992). *Statistical quality design and control - Contemporary concepts and methods*. New Jersey, Prentice Hall, Inc. Cap.15-20, p.503-744.
- DOW. (2001). *Dow polietilenol*. <http://www.doe.com.br/potyethilene/pot/fab>. (2 Jul.).
- ELSAYED, E.A.; CHEN, A. (1993). Optimal levels of process parameters for products with multiple characteristics. *International Journal Production Research*, v.31, n.5, p.1117-1132.
- EMPRESA ABC. (2001). *Aulas 1-7*. São Paulo, ASTRA S/A Indústria e Comércio. /Apostila/
- ENGEL, J.; HUELE, A.F. (1996). A generalized linear modeling approach to robust design. *Technometrics*, v.38, n.4, p.365-373.
- GIL, A.C. (1988). *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo, Atlas. p.45-60.
- GUEDES, T.A. (1996). *Procedimentos de otimização no planejamento e controle*

- da qualidade de produtos e processos*. Florianópolis. 215p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- HAALAND, P.D.; O'CONNELL, M.A. (1993). Discussion: a systematic approach to planning for a designed industrial experiment. COLEMAN, D.E.; MONTGOMERY, D.C. *Technometrics*, v.35, n.1, p.17-20.
- HAHN, G.; HOERL, R. (1998). Key challenges for statisticians in business and industry. *Technometrics*, v.40, n.3, p.195-213, Aug.
- HAHN, G.J. (1984). Discussion: Experimental design: review and comment. STEINBERG, M.D.; HUNTER, W.G. *Technometrics*, v.26, n.2, p.110-115, May.
- HILL, W.J.; HUNTER, W.G. (1966). A review of response surface methodology: a literature survey. *Technometrics*, v.8, n.4, p.571-590.
- HOERL, R.W. (2001). Six sigma black belts: what do they need to know?. *Journal Quality Technology*, v.33, n.4, p.391-406, Oct.
- HOPPEN, N.; LAPOINTE, L.; MOREAU, E. (1996). Um guia para a avaliação de artigos de pesquisa em sistemas de informação. *Revista Eletrônica de Administração*, v.2, n.3, p.1-27, nov.
- INSTITUTO NACIONAL DO PLÁSTICO. (2002). *Nobreza do plástico*. <http://www.inp.org.br/fiquepordentro>. (6 mar.).
- ISHIKAWA, K. (1976). *Guide quality control*. Tokio, Asian Productivity. p.150-180.
- JURAN, J.M.; GRZYNA JR., F.M.; BINGHAM JR., R.S. (1951). *Quality control handbook*. 3. ed. New York, McGraw-Hill. Cap.27, p.1-49.
- KHURI, A.I.; CORNELL, J.A. (1987). *Response surfaces: designs and analyses*. New York. Marcel Dekker, Inc. ASQC Quality press. Cap.3, 4, 5 e 7.
- KRUGLIANSKAS, I. (1995). Engenharia simultânea e técnicas associadas em empresas tecnologicamente dinâmicas. *Revista de Administração*, v.30, n.2, p.25-38, Abr./Jun.
- LEVINE, D.M.; BERENSON, M.L.; STEPHAN, D. (1998). *Estatística: teoria e aplicações*. Trad.por Teresa Cristina Padilha de Souza e Sergio da Costa Cortes. Rio de Janeiro, ed. Livros Técnicos e Científicos (LTC). Cap.7-12, p.329-620.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2001). *Ata publicada com a resolução n° 237: 19 de dezembro de 1997*. <http://www.ibama.gov.br>. (22 Maio).
- MONTGOMERY, D.C. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Trad.por Jaime Delgado Saldivar. Mexico, Iberoamérica.
- MYERS, R.H & MONTGOMERY, D.C. (1995). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. Canada, John Wiley & sons, Inc.

- MYERS, R.H.; KHURI, A.I; CARTER JR.; W.H. (1989). Response surface methodology: 1966-1988. *Technometrics*, v.31, n.2, p. 137-157, May.
- NIAN, C.Y.; YANG, W.H.; TARNG, Y.S. (1999). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, n.95, p.90-96.
- O PLÁSTICO invade automóveis e caminhões. (2002). *Gazeta Mercantil*, São Paulo, 6 mar. Empresas & Carreiras, p.1-6.
- OLIVEIRA, L.C. (1999). *Uso integrado do método QFD e de técnicas estatísticas de planejamento e análise de experimentos na etapa do projeto do produto e do processo*. Belo Horizonte. 270p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- PHADKED, M.S. (1989). *Quality engineering using robust design*. New Jersey, Prentice Hall/AT & T Bell Laboratories.
- PLÁSTICO. (2000). *O plástico no Brasil*. Brazil plastics on the Internet. <http://www.plastico.com.br>. (20 dez.).
- PLÁSTICO. (2001). *Revisão ISO 14004 - sistemas de gestão ambiental*. Brazil plastics on the Internet. <http://www.plastico.com.br>. (22 mar.).
- PLÁSTICOS INDUSTRIAIS. (2001). *Processos de fabricação: poliuretano*. <http://www.plasticosindustriais.com.br>. (02 Jul.).
- REASIDE, R. (1995). Teaching experimental design techniques to engineers. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v.12, n.1, p.47-52.
- REDDY, P.B.S.; NISHINA, K.; BABU, S.A. (1998). Taguchi's methodology for multi-response optimization; a case study in the Indian plastics industry. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v.15, n.6, p.646-668.
- REY, L. (1993). *Planejar e redigir trabalhos científicos*. 2.ed. São Paulo, Edgard Blücher. Cap.3-6, p.31-80.
- RIBEIRO, J.L.D; FOGLIATTO, F.S.; CATEN, C.S.T (2000). Step for multiresponse optimization in product development. *Building competencies for international manufacturing: perspectives for developing countries*. FEENG, Porto Alegre. p.1-8.
- SLACK, N. et al. (1997). *Administração da produção*. Trad.por Ailton B. Brandão, Carmem Dolores, Henrique Corrêa, Sônia Corrêa e Irineu Gianesi. São Paulo, Atlas. Cap.5, p.112-143.
- SMITH, G.M. (1998). *Statistical process control and quality improvement*. Columbus, Prentice Hall. Cap.4, p.79-112.
- STEINBERG, M.D.; HUNTER, W.G. (1984). Experimental design: review and comment. *Technometrics*, v.26, n.2, p.71-130, May.

- TAGUCHI, G. (1993). *Taguchi on robust technology development: bringing quality upstream* by Genichi Taguchi. New York, ASME.
- TAGUCHI, G.; ELSAYED, A.E.; HSIANG, T.C. (1990). *Engenharia da qualidade em sistemas de produção*. São Paulo, McGraw-Hill.
- TAY, K.M.; BUTLER, C. (1999). Methodologies for experimental design: A survey, comparison, and future predictions. *Quality Engineering*, v.11, n.3, p.343-356.
- TON, L.; SU, T.; WANG, C.H. (1997). The optimization of multi-response problems in the Taguchi method. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v.14, n.4, p.367-380.
- TRIVIÑOS, A.N.S. (1992). *Introdução à pesquisa em ciências sociais*. São Paulo, Atlas. p.109-115.
- VIERIA, S.R.B. (1996). *Um sistema de gerenciamento da qualidade para fábricas montadoras com ênfase no método Taguchi*. Florianópolis. 121p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. <http://www.eps.ufsc.br/disserta96/vieria/index> (26 Agos. 2000)
- WASILOFF, E.; HARGITT, C. (1999). Using DOE to determine AA battery life. *Quality Progress*, v.32, n.3, p.67-71, Mar.
- WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. (1996). *Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo*. Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni. v.8.
- WU, C.F.J.; CHEN, Y. (1992). A graph-aided method for planning two-level experiments when certain interactions are important. *Technometrics*, v.34, n.2, p.162-175, May.
- YONCHEV, H. (1988). New computer procedures for constructing D-optimal designs. DODGE, Y.; FEDOROV, V.V.; WYNN. *Optimal design and Analysis of experiments*. New York. Elsevier Science Publishers B. V. p.71-95.
- YUKIMURA, C.D.L. (1991). *Eficiência e qualidade no projeto de produto com ênfase no método Taguchi*. Florianópolis. 201p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.