

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

ROLAND ROBERT COLOMBARI

**APLICAÇÃO DE DELINEAMENTO DE
EXPERIMENTOS PARA O PROCESSO DE
SOLDA À PROJEÇÃO**

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

Orientador: Prof. Pedro Paulo Balestrassi, Dr.

Itajubá, Julho de 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

ROLAND ROBERT COLOMBARI

**APLICAÇÃO DE DELINEAMENTO DE
EXPERIMENTOS PARA O PROCESSO DE
SOLDA À PROJEÇÃO**

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

Banca Examinadora:

Prof. José Roberto Alves de Mattos, Dr.

Prof. João Roberto Ferreira, Dr.

Prof. Pedro Paulo Balestrassi, Dr. (Orientador)

**Itajubá,
2004.**

**Dedico este trabalho à minha família,
em especial à minha esposa Eliane e à
minha filha Sofia pela paciência.**

AGRADECIMENTOS

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

Ao Professor Pedro Paulo Balestrassi, pela valiosa amizade e orientação, sem a qual este trabalho não teria sido elaborado;

À Universidade Federal de Itajubá, através do Departamento de Produção, pela oportunidade de capacitação;

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

Aos funcionários da biblioteca e do IEM, pela atenção.

Aos colegas da MAXION Componentes Estruturais LTDA., pela colaboração e empenho durante a realização dos experimentos;

Aos meus familiares e amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Quadros	xii
Lista de Abreviaturas	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Justificativa	4
1.3. O Problema	5
1.4. Metodologia de Pesquisa	7
1.5. Estrutura do Trabalho	7
2. AS TÉCNICAS DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS	9
2.1. Considerações Iniciais	9
2.2. Estrutura do Planejamento e Análise de Experimentos	11
2.3. Definições Importantes	13
2.4. Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos	14
2.4.1 Planejamento Fatorial Completo 2^k	15
2.4.2 Análise de Variância dos Efeitos do Experimento Fatorial 2^k	23
2.4.3 Planejamento Fatorial Fracionado 2^{k-p}	30
2.4.4 Metodologia de Superfície de Resposta	35
2.4.5 Experimento Fatorial 2^k para Ajustar a Superfície de Resposta	38
2.4.6 Análise Canônica de Superfície de Resposta	41
2.5. Otimização de Processo	43
2.5.1 Otimização de Processo com uma Única Resposta	44
2.5.2 Caminho da Máxima Ascensão	45
2.5.3 Procedimento para Descobrir a Direção da Máxima Melhoria	47
2.5.4 Localização do Ponto Estacionário	48
2.5.5 Processos com Múltiplas Respostas	49
2.5.6 Múltiplas Respostas: Caminho da Máxima ascensão (<i>path of steepest ascent</i>)	50
2.5.7 Múltiplas respostas: <i>desirability method</i>	51
3. SOLDA POR PONTO, POR COSTURA E SOLDA POR PROJEÇÃO	56
3.1. Fundamentos do Processo	56
3.2. Princípios de Operação	58
3.3. O Equipamento	58
3.4. Geração de Calor	61
3.5. A Solda por Projeção	64
3.5.1 Vantagens e Limitações	65
4. PESQUISA EXPERIMENTAL	67
4.1. Introdução	67
4.2. A Empresa	68
4.3. Definição do Produto a Ser Estudado	68
4.4. A Definição das Variáveis do Processo	71
4.5. O Experimento	73
4.5.1 Planejamento	73
4.5.2 Execução	75
4.5.3 Processamento	78

5. CONCLUSÃO	84
5.1. Resultados	84
5.1.1 Resultados para a Resistência ao Torque	84
5.1.2 Resultados para a Ausência de Respingo	87
5.1.3 Resultados para a Ausência de Deformação na Rosca	90
5.1.4 Resultados para a Corrente de Solda	92
5.1.5 Resposta Otimizada	94
5.1.6 Metodologia de Superfície de Resposta	95
5.2. Simulação	99
5.3. Considerações Gerais	101
5.4. Dificuldades	102
5.5. Trabalhos Futuros	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

RESUMO

O presente trabalho é uma aplicação prática da técnica de Projeto e Análise de Experimentos para o processo de solda por projeção. O principal objetivo foi identificar a influência de alguns fatores deste processo na qualidade da solda. Dentre os vários fatores que envolvem este processo, foram avaliados a pressão da linha, o tempo de solda, a potência e a retenção. Como parâmetros de qualidade para a solda, foram analisados a resistência ao ensaio de torque, a interferência dos respingos de solda na porca, a deformação da rosca e o consumo de corrente elétrica. Para a resistência ao torque verificou-se que em grandes pressões da linha a resistência da solda tende a diminuir, também foi possível observar que existe uma relação direta com o aumento da potência e do tempo de solda. Também foi possível observar que com o aumento da potência, aumenta também a interferência na rosca devido aos respingos de solda e deformação da rosca. Quanto aos respingos, também foi observado que a sua incidência era maior para maiores pressões na linha. Concluiu-se também que apesar da pressão da linha ser um fator imprescindível para o processo de solda a projeção, o seu aumento pode provocar o enfraquecimento da junta, pois expulsa o metal fundido da região de solda. Com um menor grau de significância identificou-se o fator tempo de retenção.

ABSTRACT

This work is an application of the Design and Analyses of Experiments in the projection spot welding. The main objective was to identify the influence of some factors of this process in the welding quality. Among many factors involved in the process as a line pressure, weld time, power and retention time were evaluated. As a parameter for the weld quality evaluation, the torque resistance test, interference of spatters, deformation of the nut and consume of electric current were analyzed. To the torque resistance, the factors power and weld time was the most important. The increase on its level resulted in a increase of the response values. The factor stand off was identified as a second factor more important. the interference of spatters and deformation of the nut was influenced by this factors, but the interference of spatters increase wen the line pressure increases too. The factor retention time showed a lower influence in the process.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1: Apresentação esquemática do Ciclo PDCA
- Figura 1.2: Modelo geral de um processo ou sistema
- Figura 1.3: Modelo prático de aplicação
- Figura 2.1: Gráfico do efeito principal x_i com relação a resposta y_i
- Figura 2.2: Gráfico do efeito de interação (existente) x_1 e x_2 com relação a resposta y_i
- Figura 2.3: Gráfico do efeito de interação (inexistente) x_1 e x_2 com relação a resposta y_i
- Figura 2.4: Representação gráfica de um estudo de R&R
- Figura 2.5: Exemplo de um gráfico de probabilidade normal
- Figura 2.6: Superfície de resposta tridimensional plana
- Figura 2.7: Superfície de resposta tridimensional não plana
- Figura 2.8: Gráfico de contorno da superfície de resposta na forma de uma elipse
- Figura 2.9: Fase da otimização experimental
- Figura 2.10: Caminho da Máxima Ascensão e RS de 1ª ordem
- Figura 2.11: Fluxograma da metodologia de procura
- Figura 2.12: Desejabilidade para “quanto menor, melhor”
- Figura 3.1: Representação dos processos de solda por ponto (A), por costura (B) e por projeção (C)
- Figura 3.2: Equipamento típico para solda por ponto e por projeção
- Figura 3.3: Modelo de eletrodo para solda por costura
- Figura 3.4: Diferentes ciclos de solda por ponto e por resistência
- Figura 3.5: Distribuição da resistência e do calor nas diferentes regiões do ponto de solda
- Figura 3.6: Solda à projeção
- Figura 4.1: Produto selecionado para o estudo de caso

Figura 4.2: Componentes do suporte do limitador da cabine

Figura 4.3: Equipamento utilizado no experimento

Figura 4.4: Gráficos de probabilidade normal e histograma para o torque

Figura 4.5: Gráficos de resíduos com valor ajustado e ordem dos dados para o torque

Figura 4.6: Gráficos de probabilidade normal e histograma para o Pnp

Figura 4.7: Gráficos de resíduos com valor ajustado e ordem dos dados para o Pnp

Figura 5.1: Efeito principal para o torque

Figura 5.2: Efeitos de interação para o torque

Figura 5.3: Efeito principal para a ausência de respingo

Figura 5.4: Efeitos de interação para a ausência de respingo

Figura 5.5: Efeito principal para o calibre Passa Não Passa

Figura 5.6: Efeitos de interação para o calibre Passa Não Passa

Figura 5.7: Efeito principal para a corrente

Figura 5.8: Efeitos de interação para a corrente

Figura 5.9: Resultado da função Response Optimizer

Figura 5.10: Gráficos para o torque (RSM)

Figura 5.11: Gráficos para a corrente de solda (RSM)

Figura 5.12: Resultado da função Response Optimizer (RSM)

Figura 5.13: Resultado da simulação do torque

LISTA DE QUADROS

- Quadro 2.1: Matriz de planejamento de um experimento 2^3
- Quadro 2.2: ANOVA de um experimento fatorial com dois fatores
- Quadro 2.3: ANOVA para um experimento 2^k
- Quadro 2.4: Experimento fatorial 2^3
- Quadro 4.1: Fatores e seus respectivos níveis
- Quadro 4.2: Matriz de planejamento com o resultado dos ensaios
- Quadro 4.3: Linhas corrigidas na matriz de planejamento
- Quadro 5.1: Índices para o torque
- Quadro 5.2: Índices para o respingo
- Quadro 5.3: Índices para o calibre Passa Não Passa
- Quadro 5.4: Índices para a corrente de solda
- Quadro 5.5: Índices dos fatores para o RSM
- Quadro 5.6: Índices para o torque (RSM)
- Quadro 5.7: Índices para a corrente de solda (RSM)
- Quadro 5.8: Distribuições para o torque
- Quadro 5.9: Distribuições para a corrente de solda

LISTA ABREVIATURAS

AQC	<i>Annual Quality Congress</i>
ASQ	<i>American Society for Quality</i>
CEP	Controle Estatístico do Processo
DOE	Projeto e Análise de Experimentos - <i>Design Of Experiment</i>
FMEA	Análise de Modo e Efeito de Falhas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISO / TS	<i>International Organization for Standardization / Technical Specification</i>
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
PDCA	<i>Plan, Do, Check and Action</i>
QFD	Desdobramento da Função Qualidade - <i>Quality Function Deloyment</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
RSW	<i>Resistance Spot Welding</i>
TQC	Controle da Qualidade Total – <i>Total Quality Control</i>
VR	Variável Resposta

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 - Generalidades

A história vem demonstrando ao longo do tempo a grande importância e contribuição dos conceitos estatísticos para a evolução da qualidade nas indústrias de todo o mundo.

Segundo Chew (1957), estatística é a arte de adquirir conhecimento através de coleta, análise e interpretação de informações.

Estamos prestes a comemorar um século dessa importância, que teve o seu início quando se começou a utilizar os conceitos de “Controle da Qualidade”. Na verdade esta mudança não seria possível se não fosse conhecido o conceito de processo de fabricação, que por sua vez, foi uma das grandes descobertas da Revolução Industrial.

O conhecimento de ferramentas como histograma, pareto, gráficos de dispersão entre outras são comuns hoje em dia nas empresas de classe mundial.

Nesta mesma linha de pensamento – estatística auxiliando o processo – foi também criado o Controle Estatístico de Processo (CEP), que utilizando os princípios da “normalidade”, descreve a capacidade de um determinado processo em atender a uma determinada especificação.

Todos aqueles que trabalham nessa área em constante evolução, sabem a importância de dominar estes conceitos.

Ferramentas como FMEA, CEP, QFD, DOE entre outras não poderiam ser idealizadas se os conceitos relacionados a estatística não fossem plenamente dominados.

A maioria dos processos de melhoria aplicados atualmente tem se baseado nos princípios definidos por W. Edwards Deming, na filosofia do ciclo *PDCA* (*Plan, Do, Check and Action*), que tem como principal benefício descrever a lógica da melhoria de processos baseada em dados, conforme mostra a figura 1.

A história da Qualidade relata que os conceitos estatísticos assumiram um papel importante nas empresas. Ao longo do desenvolvimento industrial, vivido no Século XX, vários pesquisadores realizaram estudos, como Yates, Box, Bose, Kempthorne e Cochran (Montgomery, 1991) que contribuíram significativamente para a evolução das técnicas sobre o projeto de experimentos.

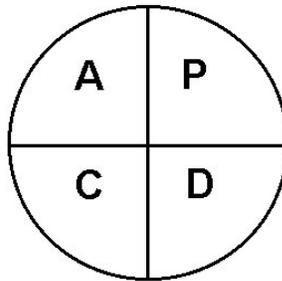


Figura 1.1: Apresentação esquemática do Ciclo PDCA

Dentre estas ferramentas citadas anteriormente, o delineamento de experimentos vem se tornando obrigatório para as empresas que necessitam demonstrar um alto grau de competitividade. Não é possível controlar um determinado processo (e garantir o seu produto) sem conhecer as suas variáveis e saber exatamente como elas interferem no resultado final. O delineamento de experimentos é a ferramenta estatística mais importante para a determinação da relação causa – e – efeito através de um modelo empírico.

Também não é possível para as empresas modernas despender muito tempo e recursos financeiros para realizar grande número de experimentos para definição destes parâmetros.

O delineamento de experimentos é a ferramenta da qualidade que nos ajuda a definir o menor número de experimentos necessários para a obtenção de um determinado resultado com a confiabilidade requerida.

Um estudo realizado recentemente pela ASQ (*American Society for Quality*), sobre o futuro da qualidade para as primeiras duas décadas do século XXI, ressalta que ***“a busca da qualidade deve mudar, tornar-se mais inovativa(inovadora), flexível e rápida na implementação das soluções eficazes que conduzam a resultados nos negócios e reflitam os desejos do consumidor”*** ANNUAL QUALITY CONGRESS (AQC - 2000).

Tal pesquisa descreve que a inovação, flexibilidade e velocidade serão os fatores críticos para o sucesso das empresas em adquirir uma vantagem competitiva. Uma prova dessa tendência é a própria ISO 9000, que sofreu uma revisão realmente profunda na sua edição de 2000, incluindo o conceito de processo como principal modelo de estruturação do sistema da qualidade, literalmente “abrindo mão” dos procedimentos que eram obrigatórios na edição de 1994. Eram 16, e na versão de 2000 são apenas 6.

Este estudo ainda ressalta que a empresa terá um desafio maior ao adotar esses novos valores, porque os consumidores têm uma visão diferente e quase incomum desses conceitos. Do mesmo modo, Moura e Taguchi (1999) descrevem que fatores críticos no desenvolvimento de produtos ou processos serão os parâmetros que criarão uma vantagem competitiva nas empresas.

Uma das formas de alcançar as características de competitividade ou fatores críticos e atender as necessidades e expectativas dos consumidores é com a utilização das técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) no desenvolvimento de produtos ou nos processos de fabricação.

Os conceitos de DOE são utilizados pelas empresas que buscam melhorar a qualidade dos produtos de forma contínua e estão efetivamente comprometidas em assegurar a satisfação de seus clientes, de maneira pró-ativa.

O experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas respostas ou variáveis de saída.

Para isso, é necessário entender que a saída de um processo – seja ele qual for – é o resultado da interação de insumos.

Esses insumos podem ser classificados de várias formas. Na administração, essa classificação leva em consideração as partes que compõem o processo, podendo ser classificadas em:

- matéria-prima
- mão-de-obra
- máquina
- método
- meios de medição
- meio ambiente

É muito comum encontrarmos essa definição na literatura, sendo identificada como a interação dos 6 m's.

Seja qual for o processo em análise, sempre será possível classificar cada um dos insumos em uma das categorias descrita acima, porém, além dessa definição também é necessário entender que esses insumos podem se apresentar na forma de fatores controláveis ou fatores não controláveis. Os fatores controláveis são aqueles que permitem a ação direta e precisa da pessoa que executa o processo. Já os fatores não controláveis são aqueles que se fazem necessários ao processo, mas que não podem ser ajustados, conforme demonstra a figura 1.2.

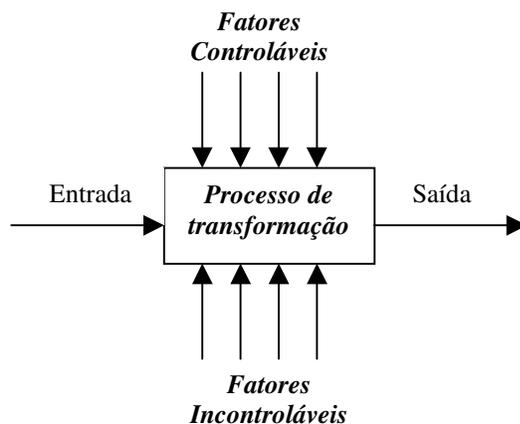


Figura 1.2. Modelo geral de um processo ou sistema

Com essa intervenção deliberada nos parâmetros do processo, pode-se definir quais as melhores condições de ajuste para obtenção do resultado desejado, ou então, identificar as causas que provocam as falhas ou as perdas de qualidade nos produtos ou nos processos de fabricação, definindo ações de melhoria mais eficazes que poderão ser praticadas pelas empresas.

1.2 - Justificativa

Cada vez mais o delineamento de experimentos vem se tornando uma das ferramentas mais importantes nas indústrias de todo o mundo, sendo praticamente obrigatória para as empresas que convivem em mercados internos e externos extremamente competitivos.

Estes mercados extremamente competitivos exigem que as empresas trabalhem de forma continuamente mais econômica, mais eficiente e mais eficaz. Dessa forma, é necessário utilizar racionalmente os recursos disponíveis para um determinado processo.

Outro ponto importante no processo de desenvolvimento de produtos e processos de fabricação é a qualidade atingida. O grande número de *recall* que atualmente assola a indústria automobilística e seus fornecedores, é, em muitos casos, decorrente de produtos e processos mal desenvolvidos. O delineamento de experimentos também é uma ferramenta extremamente eficiente para esses casos, pois define de forma econômica o melhor ajuste de um determinado processo.

A grande vantagem na utilização do DOE é definir de forma clara e objetiva quais são os fatores que interferem com maior intensidade no resultado final (saída) e quais são os parâmetros (ajustes) que retornarão o melhor resultado final.

1.3 - O Problema

Um problema é algo que pode ser entendido como uma situação indesejável, que foge do seu comportamento normal gerando uma nova realidade em desacordo com o seu objetivo.

Os problemas podem ser gerados por causas comuns ou causas desconhecidas. No caso das causas comuns, a variação observada é inerente ao processo e portanto a sua diminuição é alcançada com melhorias diretamente realizadas nos processos em estudo. No caso das causas desconhecidas, é necessária a correção dos processos. Para ambos os casos, é essencial que se conheça as causas do problema, e como apresentado anteriormente, o DOE é uma excelente ferramenta para estabelecer a relação entre causa e efeito.

O delineamento de experimentos é uma metodologia plenamente aplicável nos atuais processos de fabricação, tanto para a solução de problemas como para desenvolvimento de novos processos ou produtos. Cada vez mais é necessária a precisão no ajuste dos parâmetros para atingir uma menor variação no resultado final de um processo. Processos como injeção de plástico, usinagem e solda, entre outros, são

processos onde empresas globalizadas não conseguem mais sobreviver sem a aplicação do DOE.

O caso prático que iremos abordar neste estudo está relacionado ao processo de montagem através de solda à projeção, onde uma determinada junta é realizada sem a adição de metal, ou seja, deve existir a fusão entre as partes.

Como exemplo, iremos realizar a solda de duas porcas em uma peça estampada, conforme definido na figura 1.3. É importante observarmos que a porca a ser usada é especificamente produzida para este processo, contendo em seu perfil inicial os pontos de contato que darão origem a solda propriamente dita.



Figura 1.3. Modelo prático de aplicação

O que levou a equipe de trabalho a escolher este item como piloto para a implantação dessa metodologia foi o alto nível de reclamação dos clientes e a dificuldade na definição dos parâmetros do processo de solda.

As reclamações com relação a esta peça não eram apenas dirigidas à resistência da solda no momento de sua montagem, mas também envolviam a deformação da rosca em função da solda e a presença de respingos também decorrentes do processo de solda. Dessa forma, o objetivo inicial do trabalho é solucionar não apenas um problema mas três problemas reais.

Com relação a dificuldade na definição dos processos de solda, estes são atualmente definidos com base única e exclusivamente na experiência dos engenheiros e operadores.

1.4 – Metodologia de pesquisa

Para que seja definida a estrutura do trabalho, é necessário primeiro identificar de forma clara qual o tipo de trabalho que será realizado.

Conforme descrito por Silva (2001), este trabalho se enquadra na definição de uma pesquisa quantitativa, visto que considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las, e também como experimental, pois se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Portanto, será uma pesquisa quantitativa experimental.

1.5 – Estrutura do trabalho

Neste **primeiro capítulo** é realizada uma breve apresentação desta dissertação, mostrando-se sua justificativa e o caso prático que será abordado no decorrer do trabalho.

O **segundo capítulo** aborda as principais técnicas do projeto e análise de experimentos, no que diz respeito às principais aplicações, limitações, vantagens e desvantagens.

O **terceiro capítulo** apresenta de forma simplificada o processo de soldagem à projeção, buscando definir o processo em si, as aplicações e as variáveis que influenciam no processo, tanto as principais como as secundárias.

No **quarto capítulo**, tem-se a pesquisa experimental, onde se pretende mostrar o processo e as variáveis a serem verificadas, além de definir a técnica do Projeto e Análise de Experimento a ser utilizada, justificando o porquê desta utilização dentre as diversas técnicas existentes.

O **quinto capítulo** apresenta os resultados obtidos e toda a análise sobre os mesmos. É também neste capítulo que é realizada a conclusão do trabalho, considerações e recomendações.

Capítulo 2

2. As Técnicas do Projeto e Análise de Experimentos

2.1 Considerações iniciais

Não se pode dizer que o Projeto e Análise de Experimentos é uma técnica nova. Apesar de ter suas primeiras publicações na década de 30 e de ser ainda pouco conhecida, vem despertando um grande interesse no meio acadêmico e produtivo, especialmente após as idéias apresentadas por Taguchi nos anos 80.

Algumas aplicações datam mesmo das primeiras décadas do século, com os trabalhos pioneiros de Fisher e Student (Neto et al., 1995). De acordo com Montgomery (1991), Fisher foi o inovador da utilização de métodos estatísticos no projeto experimental, mas há outras significantes contribuições de Yates, Bose, Kempthorne, Cochran e Box. Basicamente, a experimentação tem como abordagem principal a quantitativa (Nakano et al., 1996).

Pode-se também ressaltar alguns trabalhos expressivos, como exemplo: Connell e Pherson (1997) relatam o sucesso da aplicação das técnicas de projeto e análise de experimentos que lhes permitiu a redução do índice de defeito em um determinado processo de soldagem de 47% para 0,074%, sendo realizados apenas 18 testes contra os mais de 2.000 que seriam necessários (citado por Mont'alvão, 1998); na área industrial, destacamos Box e Hunter (1978), Box e Draper (1987) e Mason, Gunst e Hess (1989). Observa-se ainda muitos trabalhos que se referem a aplicações na indústria química, como o de Câmara (1998), Antony (2000), com ênfase na melhoria da capacidade de processos, Albin (2001), na indústria eletrônica, Goodman e Wyld (2001), na indústria mecânica, Giddings, Bailey e Moore (2000), com resolução de problemas de logística através da utilização da Metodologia de Superfície de Resposta, Neto, du Pin e Guimarães (2000), Gunaraj e Murugan (2000) e Ribeiro (2002), estes três últimos voltados para a área de soldagem.

Antony, Kaye e Frangou (1998) citam o DOE como uma das técnicas estatísticas mais avançadas para melhoria da qualidade. Em novas metodologias de melhoria da qualidade, como o Seis Sigma, a técnica é de fundamental importância para diminuição da dispersão dos processos, conforme descrevem Ingle et al. (2001). Também está presente como ferramenta fundamental para os atuais sistemas de gestão da qualidade, como a ISO / TS 16949 (modelo automotivo).

Pode-se ressaltar também que as técnicas de projeto de experimentos vêm sendo cada vez mais utilizadas pelas indústrias na resolução de seus problemas, conforme destacam Konda, Guha e Parson (1999), pois é possível um maior conhecimento do processo, bem como posteriores melhorias em dispersões.

Segundo Slack et al. (1997), um projeto deve conter 5 etapas:

- Geração do conceito
- Triagem
- Projeto preliminar
- Avaliação e melhoria
- Protótipo e projeto final

Na primeira etapa, as idéias obtidas das mais diversas fontes (departamentos de pesquisa, vendas, concorrências, etc.) são transformadas em conceitos. A segunda etapa é o momento de verificar se o conceito é viável, aceito e quais são as suas vulnerabilidades. Estes pontos podem ser avaliados por várias funções, tais como marketing, produção e/ou finanças. A terceira etapa é o momento de apresentar as especificações dos produtos e processos de fabricação. A quarta etapa (avaliação e melhoria) consiste em analisar criticamente o projeto preliminar no intuito de identificar as melhorias que podem ser feitas antes de seu lançamento no mercado. Finalmente; na quinta etapa o projeto é transformado em um protótipo, que deverá passar pelos testes de validação, ser finalizado e disponibilizado para o mercado.

Estas etapas de projeto do produto também são denominadas de estágios de desenvolvimento de produtos, que compreendem 5 atividades: definição dos objetivos do produto, desenvolvimento do produto, projeto do processo de fabricação, produção, comercialização e os serviços de garantia pós – venda / assistência técnica (Taguchi, 1993).

Desta forma, as técnicas de projeto de experimentos são ferramentas com uma grande aplicação nas etapas de projeto preliminar, projeto do produto, projeto do

processo de fabricação e na etapa de avaliação e melhoria. Principalmente, porque nessas fases é necessário analisar a influência de um ou mais fatores. Quando se está avaliando apenas o efeito de um fator na resposta 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 Montgomery (1991).

No entanto, quando o que se quer é investigar o efeito provocado nas respostas dos experimentos por mais de um fator de controle, onde cada um desses fatores de controle possuem mais de um nível de regulação, se recomenda o uso de técnicas clássicas de planejamento, tais como: fatorial completo ou fatorial fracionado. O método de Taguchi também é bastante aplicado.

2.2 Estrutura do planejamento e análise de experimentos

Antes de entrarmos nas técnicas de planejamento e análise de experimentos propriamente ditas, é interessante ressaltar a importância de se realizar as atividades dos experimentos industriais de forma planejada, garantindo maior confiabilidade das informações obtidas dos produtos e/ou processos de fabricação, gerando ações de melhoria mais eficientes (Barker, 1985).

Este planejamento pode ser estruturado da seguinte forma:

1 – Conhecer o problema: Neste primeiro passo, o experimentador deve levantar o máximo de informações sobre o problema / desenvolvimento a ser analisado, evitando que sejam possíveis as duplas interpretações ou apareçam surpresas durante o desenvolvimento, devido a fatores não considerados inicialmente.

2 – Definir os fatores e seus níveis de controle: Estes são os fatores alterados intencionalmente durante o experimento. O objetivo 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. Esses fatores podem ser divididos em fatores de controle quantitativos e qualitativos. Nos experimentos, os fatores podem ser representados por números arábicos ou letras.

Nesta segunda etapa, devem ser considerados os fatores (entradas de processo), bem como os níveis de controle para o estudo. Neste momento também é importante levar em consideração não só o conhecimento teórico do observador, mas o seu conhecimento prático.

3 – Selecionar as variáveis de resposta: As variáveis de resposta são as variáveis dependentes que sofrem alguma alteração durante a realização do experimento. Essas alterações ocorrem quando estímulos são introduzidos propositalmente nos processos de fabricação em análise. Nos experimentos podem existir uma ou mais variáveis de resposta que são importantes para se avaliar.

Nesta etapa, deve-se garantir que as variáveis de resposta selecionadas sejam capazes de prover informações suficientes para a correta análise e solução do problema.

4 – Escolher o projeto experimental: Deve-se escolher o tipo de análise levando-se em consideração tempo, custo, dificuldades dos experimentos e objetivos pretendidos.

5 – Realizar o experimento: Processo de coleta de dados. Deve-se tomar cuidado para se evitar erros experimentais.

6 – Analisar os dados: Utilização de métodos estatísticos para análise dos resultados e conclusões. A utilização de *softwares* de apoio facilita em muito a execução dessa atividade. STATGRAPHICS, MINITAB, STATISTICA, SAS E SPSS são alguns exemplos desses *softwares* .

7 – Realizar a conclusão do trabalho: Conclusões através dos resultados obtidos e inferências estatísticas. Acompanhamentos e confirmações devem ser executados para validação dos resultados e conclusões.

2.3 Definições importantes

Além das definições que já foram abordadas durante a explanação do roteiro de planejamento do experimento (fatores de controle, níveis de controle e variáveis de resposta), também é importante considerar:

Fatores de ruído: São fatores aos quais não se tem controle, conhecidos ou não, que influenciam nas variáveis de resposta do experimento. Deve-se tomar cuidados especiais com estes fatores, pois os seus efeitos podem se misturar com os efeitos dos fatores de controle e mascarar o resultado do experimento.

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

Fatores de controle: É o subconjunto dos parâmetros do processo; são os fatores elegidos para estudo em vários níveis no experimento. Estes são os fatores que serão alterados intencionalmente durante a realização dos experimentos. Esses fatores podem ser expressos tanto quantitativamente como qualitativamente.

Efeito de interação: Ocorrem nos estudos de dois ou mais fatores de controle, ao considerar-se todas as combinações possíveis entre os fatores de controle.

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.

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.

Blocagem: 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 mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas.

2.4 Técnicas de planejamento e análise de experimentos

Conforme definido na etapa 4 do nosso roteiro para conduzir os ensaios, os experimentos industriais devem ser planejados em uma matriz experimental. O objetivo dessa atividade é garantir que os recursos disponíveis para a experimentação sejam bem utilizados e que as informações obtidas sejam confiáveis (Montgomery, 1991). Nesta fase do projeto do experimento, diversas técnicas de planejamento e análise de experimentos podem ser utilizadas. Dentre as técnicas mais utilizadas para a realização do projeto e análise de experimentos, destacam-se para esse trabalho as seguintes:

- Planejamento fatorial completo 2^k
- Planejamento fatorial fracionado $2^{(k-p)}$
- Metodologia da Superfície de Resposta

2.4.1 Planejamento fatorial completo 2^k

Um experimento fatorial com k fatores, cada um deles com dois 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. Após esses testes, são determinados e interpretados os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e dessa forma pode-se identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação.

Esta técnica pode ser ilustrada considerando um experimento com três fatores (x_1, x_2, x_3), cada um desses fatores 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).

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

Número do 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

Quadro 2.1 – Matriz de planejamento de um experimento 2^3

Devor et al. (1992) descreve o procedimento que pode ser utilizado para construir a matriz genérica do experimento fatorial 2^k . 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 ensaios que devem ser realizados, variando os níveis dos fatores nos valores máximo (+1) e mínimo (-1).

1. Para x_1 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -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, ..., 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, ..., 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 $x_5, x_6, x_7, \dots, x_k$. 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).

Esta forma de organizar o experimento é chamada de ordem padrão (*standard order*), conforme definido por Devor et al. (1992). Ainda, garante-se que com esse arranjo 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 equação 2.1.

$$y = k + k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 x_1 x_2 + k_5 x_2 x_3 + k_6 x_1 x_3 + k_7 x_1 x_2 x_3 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde:

k é a constante

k_1 é o coeficiente do fator de controle x_1

x_1 é o primeiro fator de controle

k_2 é o coeficiente do fator de controle x_2

x_2 é o segundo fator de controle

k_3 é o coeficiente do fator de controle x_3

x_3 é o terceiro fator de controle

k_4 é o coeficiente da interação entre os fatores $x_1 x_2$

$x_1 x_2$ é a interação entre o primeiro e o segundo fator de controle

k_5 é o coeficiente da interação entre os fatores $x_2 x_3$

$x_2 x_3$ é a interação entre o segundo e o terceiro fator de controle

k_6 é o coeficiente da interação entre os fatores $x_1 x_3$

$x_1 x_3$ é a interação entre o primeiro e o terceiro fator de controle

k_7 é o coeficiente da interação entre os fatores $x_1 x_2 x_3$

$x_1 x_2 x_3$ é a interação entre o primeiro, o segundo e o terceiro fator de controle

O método generalizado que pode ser utilizado para estimar os efeitos principais e de interação dos fatores é apresentado a seguir, conforme descrito por Devor et al. (1992) e Montgomery (1991).

Quando o nível de um determinado fator é alterado de (-1) para (+1) e os demais fatores são mantidos constantes, a mudança da resposta média observada correspondem aos efeitos principais. Isso é feito multiplicando os resultados da coluna y_i pelos valores +1 e -1 associados a coluna x_i da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se deseja estimar (quadro 2.1). Em seguida, os valores obtidos devem ser somados e divididos pela metade do número de ensaios realizados, conforme demonstra a equação 2.2.

$$E_i = \sum y_i * x_i / (N / 2) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Sendo que:

E_i é o efeito estimado

N é o número total de observações

$\sum y_i * x_i$ é a soma dos resultados (y_i) do experimento multiplicados pela coluna x_i .

Para determinar o efeito de interação, o primeiro passo é construir 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 . Após isso, seguindo o exposto na equação 2.2, os valores +1 e -1 associados à coluna $x_1 x_2$ da matriz experimental são utilizados para estimar o efeito de interação.

Conforme descrito por Devor et al. (1992) e Montgomery (1991), outros métodos para calcular os efeitos podem ser utilizados.

Nesta etapa dos experimentos alguns autores comentam que embora seja simples estimar esses efeitos, muitas vezes é difícil estimar qual é realmente o fator de controle que produz uma diferença significativa nas respostas. Na maioria das vezes necessita-se usar os gráficos lineares e de probabilidade normal. Nessa fase do desenvolvimento do experimento podem ser utilizados diferentes *softwares* para construir os gráficos.

Para representar e interpretar graficamente os efeitos principais e de interação é necessário:

- o sinal (+-) indica a direção do efeito, isto é, se a resposta aumenta ou diminui com a variação do nível;
- a magnitude indica a intensidade do efeito.

A figura 2.1 a seguir representa a forma gráfica do efeito principal (E_i). 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 (quadro 2.1).

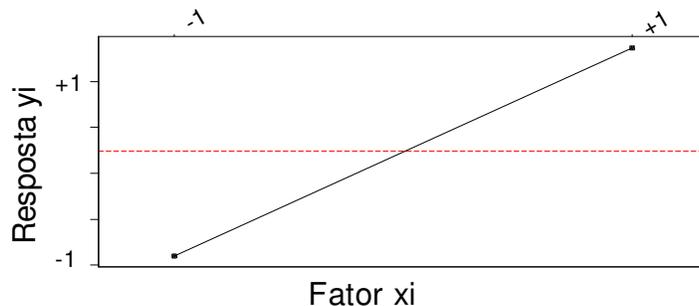


Figura 2.1: Gráfico do efeito principal x_i com relação a resposta y_i

As figuras 2.2 e 2.3 apresentam os gráficos dos efeitos de interação. Esses gráficos descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores. A figura 2.2 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. A Figura 2.3 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 .

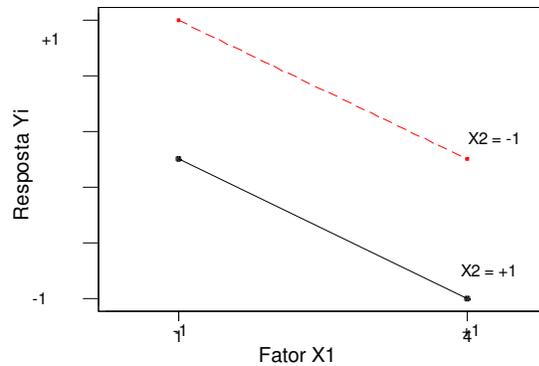


Figura 2.2: Gráfico do efeito de interação (inexistente) x_1 e x_2 com relação a resposta y_i

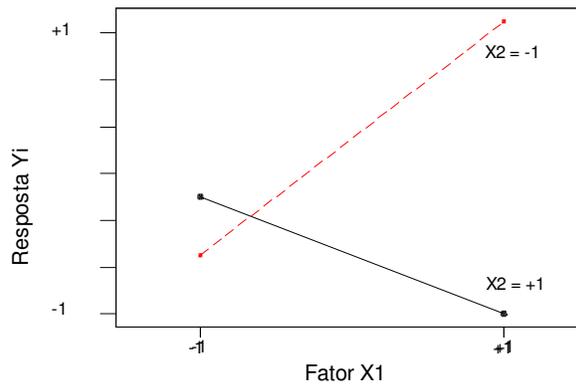


Figura 2.3: Gráfico do efeito de interação (existente) x_1 e x_2 com relação a resposta y_i

O gráfico de probabilidade normal apresentado na figura 2.5 é um outro tipo de gráfico que pode ser utilizado na análise de experimentos. Segundo Devor et al. (1992), esses gráficos são utilizados nas situações onde é importante obter uma estimativa independente do erro experimental para julgar a importância dos efeitos principais e de interação, mas não é possível repetir um experimento fatorial 2^k . Esse tipo de erro é proveniente de fatores incontroláveis que produzem uma variação nas respostas ao realizar os ensaios sob condições preestabelecidas. Esses erros podem ser classificados em dois grupos, conforme segue (Galdámez, 2002):

- **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.

Estes erros podem aparecer na forma de variações em diversos momentos durante a execução de um processo, e/ou estar relacionados com diferentes etapas do processo. Dessa forma, as variações podem também ser identificadas como sendo do processo de produção, do instrumento de medição, do operador, da peça, etc. Todas essas variações devem ser absorvidas pela tolerância especificada para a característica em estudo.

Entre estas variações, destacam-se as relacionadas com o sistema de medição utilizado, onde a técnica mais usual de avaliação é o estudo de repetitividade e reprodutividade (R&R), que avalia respectivamente a variação do equipamento de medição e a variação do avaliador.

O estudo de repetitividade está relacionado às origens da variação de dentro do processo de medição, sendo a variação introduzida no processo de medição vinda de um ou mais elementos do processo de medição.

O estudo de reprodutividade está relacionado com as variações através do processo de medição, sendo a variação introduzida no processo de medição por efeitos que atravessam o processo de medição.

O estudo de repetitividade e reprodutividade representa a variação total do sistema de medição e pode ser demonstrado pela soma da variância do equipamento com a variância do avaliador, conforme mostra a figura 2.4 e a equação 2.3.

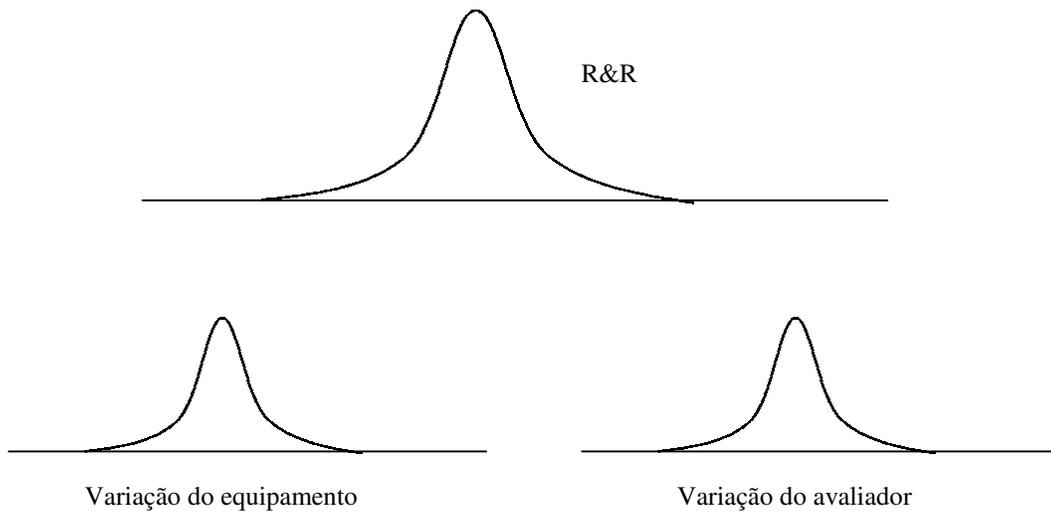


Figura 2.4: Representação gráfica de um estudo de R&R

$$\sigma^2_{\text{Equipamento}} + \sigma^2_{\text{Avaliador}} = \sigma^2_{\text{R\&R}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

O uso dos gráficos de probabilidade normal é baseado no fato de que os efeitos principais ou de interação, que são desprezíveis, se apresentam segundo uma distribuição normal centrada em zero e com variância σ^2 . Ou seja, esses efeitos tendem a se concentrar ao longo de uma reta normal no gráfico.

No entanto, se alguns dos pontos marcados no gráfico apresentam um desvio de posição em relação a essa linha normal 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). A figura 2.5 ilustra essa condição.

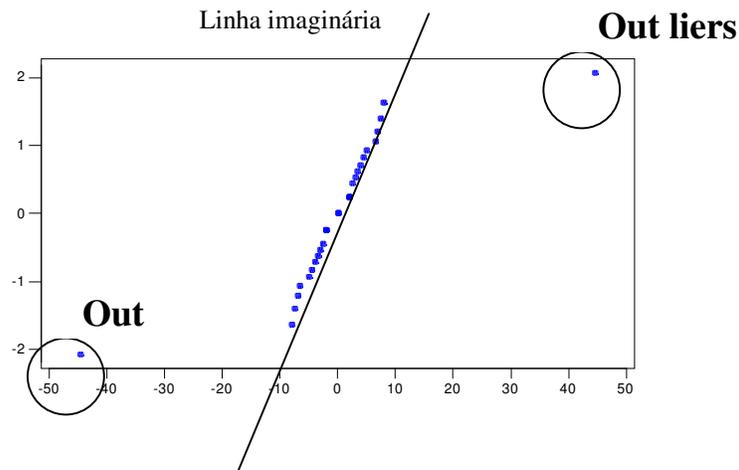


Figura 2.5: Exemplo de um gráfico de probabilidade normal

Os experimentos fatoriais 2^k devem ser realizados com pelo menos quatro fatores para garantir a aplicação efetiva do método (Devor et al., 1992). Segundo Galdámez (2002), um número menor de parâmetros 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 (Montgomery, 1991). Ainda, Galdámez (2002) ressalta 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:

- 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 réplicas, porque na maioria das vezes os custos da experimentação são elevados, com isso os erros experimentais não podem ser estimados;

- 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.

Para solucionar as limitações apresentadas anteriormente, uma dos caminhos é elaborar e planejar experimentos industriais utilizando a técnica de confundimento (*factorial experiments with design confounded*). A técnica de confundimento, é uma ferramenta 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 réplica (Montgomery, 1991).

Outras soluções podem ser obtidas através das técnicas de experimentos fatoriais fracionados 2^{k-p} . Nos próximos tópicos, o planejamento experimental com a técnica de fatorial fracionado 2^{k-p} será abordado com mais detalhes.

2.4.2 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 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.

Alguns pontos importantes devem ser considerados antes de descrever as técnicas estatísticas (Galdámez, 2002).

- 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 interativos, com isso deve-se considerar que os primeiros testes na maioria das vezes são realizados para refinar as informações técnicas dos produtos ou dos processos de fabricação.

Montgomery (1991), Devor et al. (1992) e Levine et al. (1998) propõem uma metodologia ou uma série de passos que podem ser utilizados para conduzir o teste de hipótese dos experimentos. A seguir serão apresentados alguns conceitos e pontos importantes desse procedimento (Galdámez, 2002):

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 estatísticas (t-student, F-Fisher, 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 análise de *P-value*, portanto, alguns pontos importantes sobre essa análise estatística serão abordados posteriormente. Maiores informações sobre as outras distribuições podem ser obtidas na literatura que trata de planejamento e análise de experimentos.

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 rejeitada quando ela é verdadeira e o erro tipo II ocorre quando a hipótese nula não é rejeitada sendo falsa.

No entanto, 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 ao realizar os experimentos industriais, 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 (α) do teste estatístico, que no presente experimento será representado pela análise do *P-value*. Geralmente, a equipe pode controlar a probabilidade do erro tipo I decidindo o nível de risco (*P-value*) que está disposta 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 *P-value* em 0,1 ou menos. Ainda, uma vez selecionado o valor de α 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 2.6, para a estatística F. Para o experimento que será apresentado nos próximos capítulos, o valor de *P-value* para se rejeitar a hipótese nula será de 0,05.

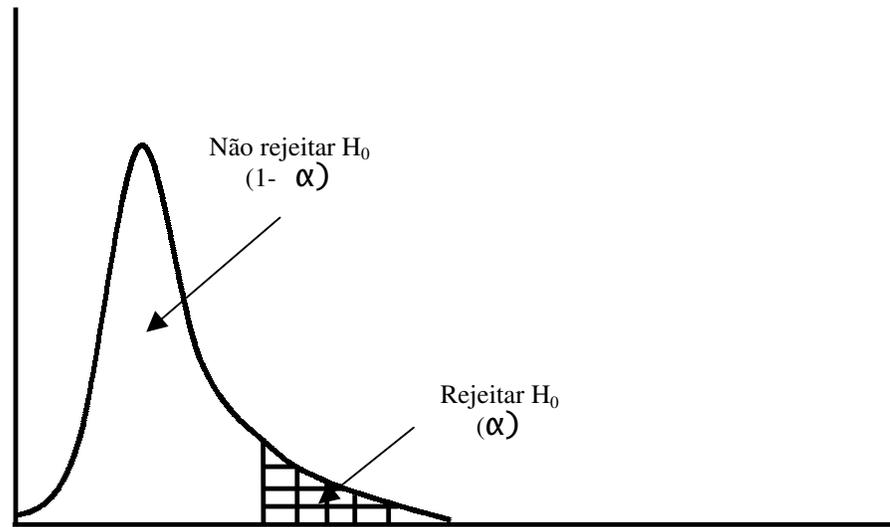


Figura 2.6: Regiões de rejeição e aceitação para uma distribuição F

- 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 um determinado intervalo contém a média da população. 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., 1998).

Considerando-se esses fatores, a técnica estatística de Análise de Variância é descrita a seguir. Essa técnica é denominada de ANOVA (*analysis of variance*). As definições são baseadas nas referências bibliográficas de Devor et al. (1992) e Montgomery (1991). Outras técnicas também podem ser utilizadas para analisar 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. A análise de variância é utilizada

para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as hipóteses investigadas com os experimentos industriais.

Para ilustrar o procedimento, considere 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 definido pela eq. 2.4. Com a análise de variância procura-se identificar se alguns dos coeficientes desse modelo são realmente efeitos significativos ou se são reflexos do erro experimental.

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

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

sendo que:

n é o número de observações realizadas;

SS_{E_i} é a soma de quadrados;

E_i é o parâmetro.

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

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

sendo que:

T é a soma total das observações;

y_{ij} são as respostas experimentais.

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

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

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

$$SS_R = SS_D - SS_{E_1} - SS_{E_2} - SS_{E_{12}} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Os resultados da ANOVA são geralmente apresentados conforme exposto no quadro 2.2. 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 .

Fonte de variação	Soma de quadrados	g.l.	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
E_{12}	SS_{E12}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{E12}=SS_{E12}/(a-1)(b-1)$	MS_{E12}/MS_R
Erro	SS_R	$ab(n-1)$	$MS_{E1}=SS_{E1}/ab(n-1)$	
Total	SS_D	$abn-1$		

Quadro 2.2 – ANOVA de um experimento fatorial com dois fatores

O método de análise de variância apresentado 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 para o experimento fatorial 2^k inclui k efeitos principais, ($k = 2$) interações de dois fatores, ($k = 3$) interações de três fatores, ($k = 4$) interações de quatro 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 2.3 é representado o quadro geral de ANOVA para um experimento fatorial 2^k (Montgomery, 1991).

$$SS_{E_{12,\dots,k}} = \frac{(E_{12,\dots,k})^2}{n2^k} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

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

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade
<i>Efeitos principais</i>		
E_1	SS_{E1}	1
E_2	SS_{E2}	1
.	.	.
.	.	.
E_k	SS_{Ek}	1
<i>Interação de dois fatores</i>		
E_{12}	SS_{E12}	1
E_{13}	SS_{E13}	1
.	.	.
.	.	.
E_{jk}	SS_{Ejk}	1
<i>Interação de três fatores</i>		
E_{123}	SS_{E123}	1
E_{124}	SS_{E124}	1
.	.	.
.	.	.
E_{ijk}	SS_{Eijk}	1
.	.	.
.	.	.
<i>Interação de k fatores</i>		
$E_{123...k}$	$SS_{E123...k}$	1
.	.	.
.	.	.
Erro	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k-1$

Quadro 2.3 – ANOVA para um experimento 2^k

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 v_1 (numerador) e v_2 (denominador) graus de liberdade, para um dado nível de significância (α), 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.

O quadro ANOVA é facilmente construído com o auxílio de softwares estatísticos (EXCEL, MINITAB, STATISTICA). Além dessa vantagem, na maioria desses *softwares* está incluído o *P-value*. 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 *P-value* for menor que o nível de significância escolhido (α), a hipótese nula é rejeitada.

No entanto, a inferência estatística com a ANOVA é um processo que requer alguns cuidados (Galdámez, 2002):

- 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).

2.4.3 Planejamento fatorial fracionado 2^{k-p}

É comum verificar a necessidade de estudar o efeito de um ou mais fatores de controle ao mesmo tempo quando se realiza (Abraham et al., 1999). Uma das soluções para esse tipo de problema é aplicação das técnicas de planejamento de experimentos fatoriais fracionados 2^{k-p} . 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 (Montgomery, 1991).

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 se 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 (Montgomery, 1991): Considere-se um estudo com três fatores de controle (1, 2, e 3), com dois níveis cada um (+1 e -1). A equipe responsável por conduzir o experimento concluiu que economicamente é inviável realizar as oito combinações ($2^3 = 8$) da matriz de planejamento. 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).

Todas as combinações possíveis do experimento fatorial completo 2^3 são apresentadas no quadro 2.4. 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 a parte positiva (testes número 1, 2, 3 e 4), o que é mais usual, ou executar a outra parte (testes número 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 $I = -123$.

Combinações tratamento	Efeito fatorial								y_i
	I	1	2	3	12	13	23	123	
1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_1
2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_2
3	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_4
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_8

Quadro 2.4 – Experimento fatorial 2^3

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 2.4. 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 serão 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).

2.4.4 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 para a 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. Este 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).

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Sendo que X_1, X_2, \dots, X_k são os fatores experimentais e ε 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 (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

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (\text{Eq. 2.10})$$

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 ε é o erro experimental.

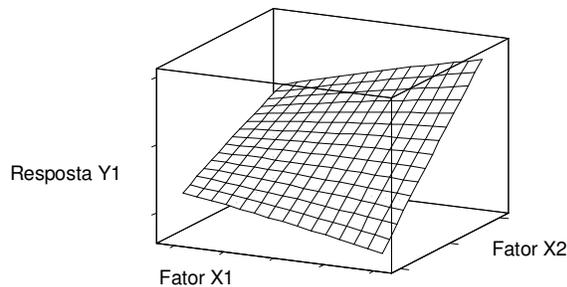


Figura 2.6: Superfície de resposta tridimensional plana

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).

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

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 ε é o erro experimental.

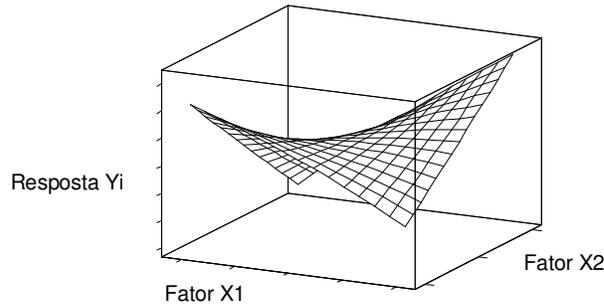


Figura 2.7: Superfície de resposta tridimensional não plana

Outro procedimento que pode ser utilizado para ajustar a função de resposta é por meio de aproximações por funções *splines*, descrito por 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 utilizados na MSR. A classificação das técnicas de experimentos será realizada conforme o grau do polinômio que é utilizado para ajustar a resposta.

2.4.5 Experimento fatorial 2^k para ajustar a superfície de resposta

Myers & Montgomery (1995) 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.

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

sendo que ξ_i representa o nível da variável natural do processo de fabricação, n_c , é o ponto central utilizado no experimento e Δx_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.

A ferramenta estatística que é utilizada para testar se existe ou não curvatura na região central será descrita no próximo tópico. 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 deve conter pelo menos três (3) níveis para cada fator (Montgomery, 1991). Neste caso, a série de experimentos que podem ser utilizados ao 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 2^k pontos axiais e n_c pontos centrais (Box & Hunter, 1957). Os 2^k pontos axiais são localizados em $(\pm\alpha_1, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha_1, 0, \dots, 0), (0, 0, \pm\alpha_1, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm\alpha_1)$, sendo que α_1 é dado pela eq. (2.13).

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

O ponto axial no planejamento é utilizado para garantir que o experimento seja rotável. Segundo Montgomery (1991), com esse ponto é possível estimar os coeficientes da superfície em todas as direções possíveis. Ainda, o valor de α_1 depende do número de pontos na porção fatorial do planejamento.

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).

2.4.6 Análise canônica de superfície de resposta

Em alguns experimentos industriais será necessário caracterizar a superfície de resposta. Assim, com base na literatura de experimentos industriais, alguns pontos importantes desse procedimento são apresentados (Myers & Montgomery, 1995; Montgomery, 1991).

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. (2.14)). 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 (λ_i) da equação canônica que passa por esse ponto é utilizada a eq. (2.15).

$$y = y_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (\text{Eq. 2.14})$$

sendo que y_0 representa a resposta no ponto x_0 , w_k é a combinação linear das x_i e as λ_i representa as constantes ou as raízes de uma matriz (B).

$$[B - \lambda I] = 0 \quad (\text{Eq. 2.15})$$

sendo que B é uma matriz formada pelos coeficientes quadráticos puros (diagonal) e pelo valor médio dos coeficientes de interação (fora da diagonal), λ 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 (Galdámez, 2002):

- Se todas as raízes λ_i são negativas, significa que o gráfico de contornos da superfície de resposta (figura 2.8) será na forma de uma elipse, onde o centro 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 λ_i são diferentes, significa que x_0 é um ponto de sela, conforme representado pela figura 2.8. 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.

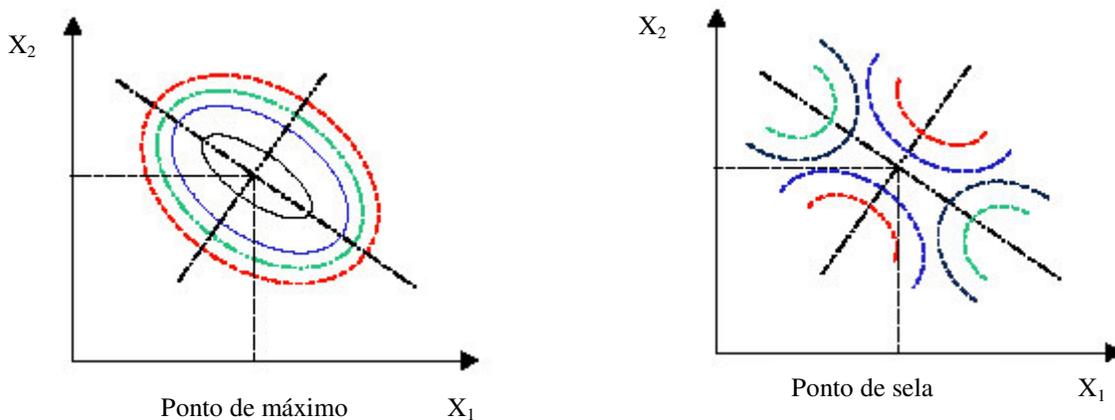


Figura 2.8: Gráfico de contorno da superfície de resposta

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. (2.16).

$$w_i = M'(x_i - x_0) \quad (\text{Eq. 2.16})$$

sendo que 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 (λ_i) do modelo canônico. Segundo Montgomery (1991), as equações normalizadas do sistema podem ser construídas por meio da eq. (2.17).

$$(B - \lambda_i I) * m_i = 0 \quad (\text{Eq. 2.17})$$

sendo que a soma do quadrados dos elementos m_{ji} de cada uma das colunas 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 M normalizados, será necessário que cada um desses valores seja dividido pela eq. (2.17) (Montgomery, 1991; Box & Hunter, 1957).

$$\sqrt{(m'_i)^2 + (m'_{ji})^2} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

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. (2.17) 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.

2.5 Otimização de processo

O objetivo principal de um DOE é sempre encontrar condições de operação de processos que maximizem (ou minimizem) a resposta de um sistema. Contudo, nem sempre o início do processo de experimentação é evidente. Logicamente, deve-se procurar uma metodologia que direcione o DOE nesse sentido, ou seja, ser desenvolvido de maneira eficaz na direção da maior melhoria possível para o sistema de respostas. Como, portanto, determinar a melhor região do processo para que se possa iniciar e desenvolver uma eficiente experimentação? Como dar o primeiro passo na direção mais coerente?

A região de ótimo para a experimentação de um processo é usualmente determinada depois que uma seqüência de experimentos tenha sido conduzida, e uma série de modelos (de regressão) obtidos. Em muitas aplicações, o objetivo da experimentação é tão somente a obtenção de modelos empíricos que melhorem uma resposta de interesse. Do ponto de vista matemático, o objetivo é determinar um conjunto de condições operacionais X_1, X_2, \dots, X_n , que maximizem ou minimizem, conforme o caso, um sistema de respostas Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Na otimização experimental, diferentes técnicas são empregadas para se encontrar o modelo que melhor se ajusta à realidade do processo em estudo, uma vez que a regressão linear múltipla é apenas uma

estimativa da resposta real do sistema. O objetivo, portanto, da experimentação, é chegar o mais próximo possível da região de ótimo real.

Em alguns pontos, o processo de otimização experimental difere das técnicas matemáticas clássicas, como a Programação Linear e Não-Linear, por exemplo. Primeiramente, porque o processo experimental é iterativo, ou seja, os experimentos conduzidos em um conjunto de condições (níveis e fatores) resultam em um determinado modelo de ajuste, que indica por onde se deve iniciar a procura pelas condições melhores, ou, pelas condições para a próxima tentativa experimental. Como já dito anteriormente, os coeficientes dos modelos de regressão são apenas estimativas de equações ajustadas, que podem mudar no decorrer do processo de otimização. Este é uma diferença significativa em relação à otimização matemática, onde as funções são, geralmente, fixas. Outra diferença que se observa é que modelos empíricos (experimentais), usualmente contém uma variabilidade aleatória devido a fatores incontroláveis ou desconhecidos. Isto implica que, quando um experimento é repetido sob as mesmas condições, o modelo ajustado poderá ser diferente. Já a otimização clássica não considera este tipo de variabilidade. Por último, as respostas ajustadas pelos modelos de regressão são aproximações locais, o que implica que as entradas do processo dependem da habilidade e do conhecimento do experimentador sobre o processo a ser estudado. A otimização clássica é apenas uma forma automatizada de solucionar problemas através da construção e da resolução de algoritmos.

2.5.1 Otimização de processo com uma única resposta

De acordo com Box et al. (1950), a otimização experimental de sistemas com uma única variável de resposta deve ser conduzida em duas fases. A primeira consiste numa seqüência de procura linear na direção da máxima otimização. Esta procura é realizada até que haja evidência de que a direção escolhida não resulta em melhorias adicionais para o modelo, ou, enquanto não houver evidências de falta de ajuste para o modelo de primeira ordem.

A segunda fase só é realizada se for detectada falta de ajuste no modelo de primeira ordem, quando, ao contrário, um modelo de segunda ordem (modelo polinomial quadrático) deve ser aplicado. Evidentemente, nem todas as respostas

requererão ajustes dessa natureza, e, em tais casos, um modelo encontrado na primeira fase será suficiente quando a resposta não mais experimentar melhorias adicionais.

A figura a seguir representa esquematicamente esta estratégia.

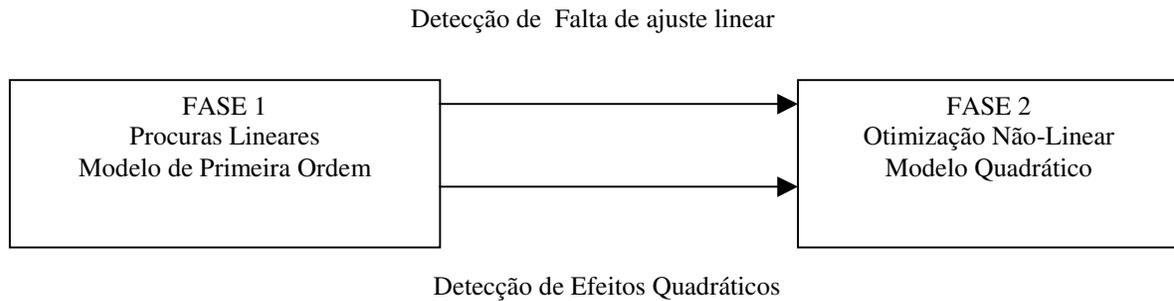


Figura 2.9: Fase da otimização experimental

2.5.2 Caminho da máxima ascensão

Quando uma experimentação é planejada para um processo novo, sobre o qual se conhece pouco, ou para o qual nunca se desenvolveu um procedimento experimental, existe uma probabilidade muito grande de que as condições experimentais supostas em um primeiro momento estejam muito distantes da real região de ótimo. Um modelo de primeira ordem servirá, como uma boa aproximação local, em uma pequena região próxima às condições iniciais de operação do experimento, e bem distante, provavelmente, da região onde o processo exhibe curvatura. Entretanto, faz sentido utilizar-se um ajuste de primeira ordem. Usualmente, um experimento fatorial fracionário 2^{k-p} , com replicações, utilizando-se o conjunto atual de parâmetros do processo, pode servir de experimento original.

Conforme comentado no item anterior, o objetivo é manter o experimento ao longo da direção de máxima ascensão (*Path of Steepest Ascent*) até que a resposta do experimento não experimente mais melhorias adicionais. Neste ponto, um novo experimento fatorial fracionário, com center points, deverá ser conduzido, de maneira a se determinar a nova direção. Este processo deve ser repetido até que alguma curvatura significativa seja detectada. Quando isto acontece, significa que os parâmetros do experimento estão próximos da região de máximo. Quando, porém, for detectada curvatura significativa ou falta de ajuste considerável no modelo linear, o experimentador deve passar a Fase 2 do método.

O raciocínio é análogo no caso de se desejar a minimização; só que o caminho será inverso, buscando-se sempre o ponto mais baixo possível para a resposta

Há duas coisas importantes que o experimentador deve observar na Fase 1: determinar a direção de procura e determinar o comprimento do passo utilizado para mover o experimento da condição atual em direção à região de máximo.

A direção de máxima ascensão (*Path of Steepest Ascent*) é a direção na qual a resposta aumenta mais rapidamente. Esta direção é paralela a uma reta “normal” traçada sobre as superfícies de respostas ajustadas, passando pelo centro (*Center Points*) da região de interesse, a partir do modelo ajustado de primeira ordem. Conseqüentemente, o comprimento dos passos ao longo desse caminho de melhoria é proporcional aos coeficientes de regressão. O comprimento inicial do passo a ser dado depende em muito da experiência e do conhecimento que o experimentador tem do processo analisado.

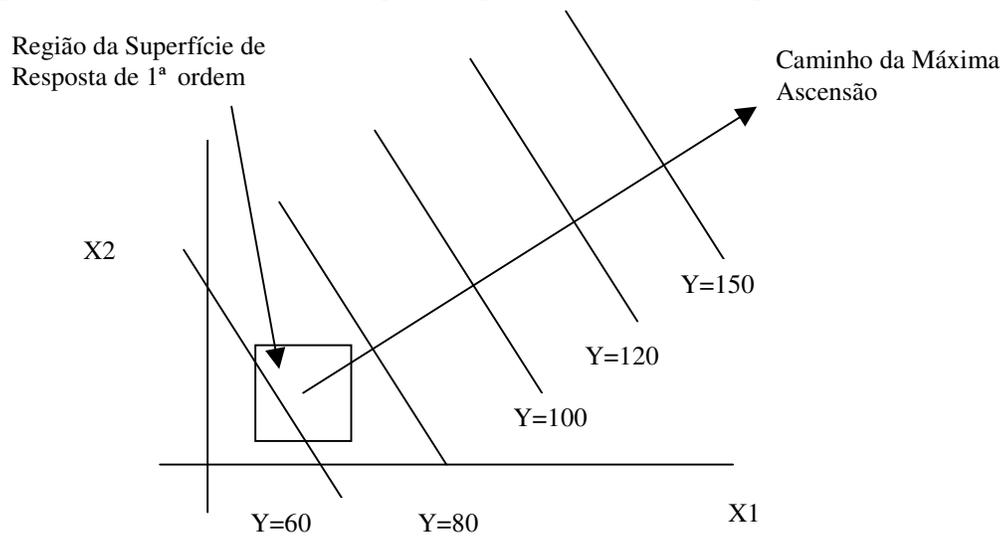


Figura 2.10: Caminho da Máxima Ascensão e RS de 1ª ordem

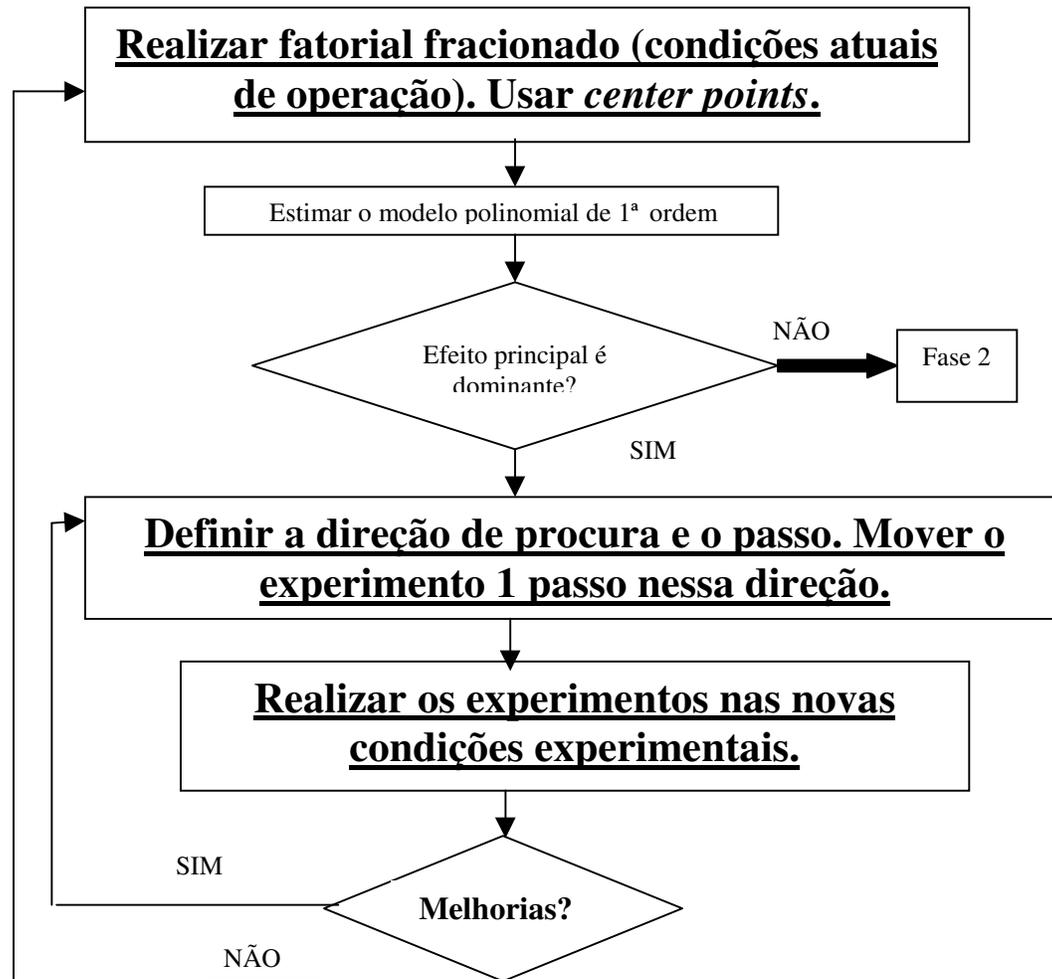


Figura 2.11: Fluxograma da metodologia de procura

2.5.3 Procedimento para descobrir a direção da máxima melhoria

Suponha que um modelo de primeira ordem foi empregado e forneceu uma aproximação razoável. Como a falta de ajuste (devido à curvatura quadrática pura e interações) é muito pequena se comparada aos efeitos principais, a metodologia descrita anteriormente deve ser empregada. Se o objetivo for a maximização de y , o gradiente da resposta y deverá ser utilizado.

A direção do gradiente, g , é dada pelos valores dos estimadores de seus parâmetros. Como os coeficientes do modelo de regressão dependem de um fator de escala, o gradiente também dependerá. Trabalhando, portanto, com as variáveis codificadas, teríamos:

$$x_i = \frac{X_i - \left(\frac{X_{sup} + X_{inf}}{2} \right)}{\left(\frac{X_{sup} - X_{inf}}{2} \right)} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (\text{Eq. 2.19})$$

onde: X_{sup} = Valor Natural do Nível Superior do Fator i ;

X_{inf} = Valor Natural do Nível Inferior do Fator i .

Obs.: Por “Valor Natural” entenda-se o valor real, que geralmente é conhecido nos equipamentos envolvidos no experimento. Por exemplo: 20 °C, 40 °C; 25 PSI, 35 PSI.

As variáveis codificadas x_i são recomendadas porque fornecem estimativas dos parâmetros experimentais independentemente da escala ou do sistema de medição adotado.

As coordenadas do conjunto de fatores na direção da máxima ascensão, posicionada a uma distância ρ da origem, é dada por:

$$x_i^* = \rho \frac{b_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^k b_j^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (\text{Eq. 2.20})$$

2.5.4 Localização do ponto estacionário

Otimizar uma resposta significa encontrar o melhor conjunto de soluções para as variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_k que produza, em função do modelamento matemático do processo, o melhor valor para a variável dependente y .

Do cálculo diferencial vem que, se uma função possui ponto de máximo ou de mínimo (conforme o caso), a derivada primeira dessa função é igual a ZERO. No caso da função ser composta de um conjunto de variáveis independentes, as derivadas parciais da função em relação a cada uma das variáveis independentes também deve ser ZERO, para que haja um ponto de máximo ou de mínimo. Este ponto é denominado Ponto Estacionário. Em notação matemática, isto pode ser escrito como:

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

Escrevendo-se um modelo de segunda ordem em forma de notação matricial, tem-se que:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Onde:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ & & \dots & \\ \text{Simétrico} & & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

Nas matrizes acima, b representa o vetor dos coeficientes de regressão de primeira ordem e B é uma matriz simétrica, onde a diagonal principal é formada pelos coeficientes dos termos quadráticos puros. Os demais coeficientes de B são representados pela metade do valor dos coeficientes mistos. Como a matriz é simétrica, vale ressaltar que os mesmos coeficientes estarão presentes na parte de baixo da diagonal principal.

Igualando-se a ZERO a derivada de y em relação aos elementos do vetor x , tem-se que:

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = b + 2Bx = 0 \quad (\text{Eq. 2.23})$$

Logo, o ponto estacionário x_s , será:

$$x_s = -\frac{1}{2}B^{-1}b \quad (\text{Eq. 2.24})$$

2.5.5 Processos com múltiplas respostas

Inevitavelmente, em algumas situações, os processos deverão atender a mais de uma resposta. É muito comum nos círculos de qualidade desejar-se que todas as características de um produto, que determinem a satisfação do cliente, sejam totalmente

atendidas. Evidentemente, nem sempre esta é uma tarefa fácil. Contudo, matematicamente, é possível se encontrar soluções para as funções de otimização que atendam a múltiplos requisitos.

É o que vamos discutir a partir de agora: métodos que são úteis na obtenção de variáveis otimizadas, atendendo a mais de uma resposta.

2.5.6 Múltiplas respostas: caminho da máxima ascensão (*path of steepest ascent*)

Quando, para um sistema com múltiplas respostas, houver uma boa adequação destas respostas a um modelo linear, o objetivo da otimização passa a ser o de encontrar a direção ou o caminho que conduza à máxima ascensão das respostas do experimento. Este caminho deve considerar os caminhos das respostas individuais simultaneamente, e, posteriormente, promover um balanceamento dessas respostas. O método a seguir, contudo, não é aplicável a experimentos que possuam respostas não lineares, tais como o modelo quadrático, por exemplo. Para os modelos de ordem mais alta, existem outros métodos.

O procedimento a ser descrito denomina-se Estratégia da Prioridade Ponderada, e utiliza o caminho de máxima ascensão para cada resposta a ser investigada, conforme segue:

- Encontrar os gradientes g de todas as respostas;
- Determinar as prioridades relativas π_i para cada uma das k respostas. Então, será possível se determinar o gradiente ponderado para direção de procura, tal que:

$$g = \frac{\pi_1 g_1 + \pi_2 g_2 + \dots + \pi_k g_k}{\sum_{i=1}^k \pi_i} \quad (\text{Eq. 2.25})$$

E a direção ponderada será dada por:

$$d = \frac{g}{\|g\|} = \frac{g}{\sqrt{\sum g_i^2}} \quad (\text{Eq. 2.26})$$

Os fatores de ponderação também poderão ser baseados em R^2 , tal como:

$$\pi_j = \frac{R_j^2}{\sum_{i=1}^k R_i^2}, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (\text{Eq. 2.27})$$

2.5.7 Múltiplas respostas: *desirability method*

O método da função de desejabilidade (*Desirability*) é um dos mais eficientes métodos empregados nos ambientes industriais para a otimização de processos que possuem múltiplas respostas. Este é um método baseado na idéia de que a qualidade de um produto ou processo que tenha múltiplas características, para os quais existam limites desejados, depende da não violação desses limites. O método procura fornecer os melhores valores de x que forneçam as respostas mais desejáveis.

Para cada resposta $Y_i(x)$, uma função de desejabilidade $d_i(Y_i)$ determina valores entre 0 e 1 que devem multiplicar a função $Y_i(x)$. Se este valor for igual a zero, $d_i(Y_i)$ seria igual a zero, o que representa um valor totalmente indesejável para a resposta $Y_i(x)$. Ao contrário, um valor de $d_i(Y_i)$ igual a um representa uma resposta completamente desejada.

Quando os valores das funções de desejabilidade são combinados, usando-se uma média geométrica, tem-se o que se denomina Desejabilidade Total (D). Esta função total pode ser expressa pela equação.

$$D = (d_1(Y_1).d_2(Y_2).....d_k(Y_k))^{1/k} \quad (\text{Eq. 2.28})$$

onde k expressa o número de respostas.

Há funções de desejabilidade particulares para cada tipo de resposta. Dependendo da aplicação, há três tipos de respostas desejáveis: quanto maior, melhor (maximização); quanto menor, melhor (Minimização) e quanto mais no alvo, melhor (Alvo). Baseado nesta idéia e nos limites superior, inferior e no alvo de cada função, DERRINGER et al. (1980) criaram funções específicas para cada tipo de resposta desejada.

Esquemáticamente, se, por exemplo, houvesse uma resposta que devesse ser minimizada. É necessário se determinar um valor alvo e um valor máximo (limite superior) para o valor da resposta. A desejabilidade para esta resposta abaixo do valor

alvo é um; acima do máximo (Limite superior) é Zero. Quanto mais próximo do alvo, mais próximo de um estará o valor da função desejabilidade. A figura 2.12 a seguir, demonstra graficamente esta condição de “quanto menor, melhor”!

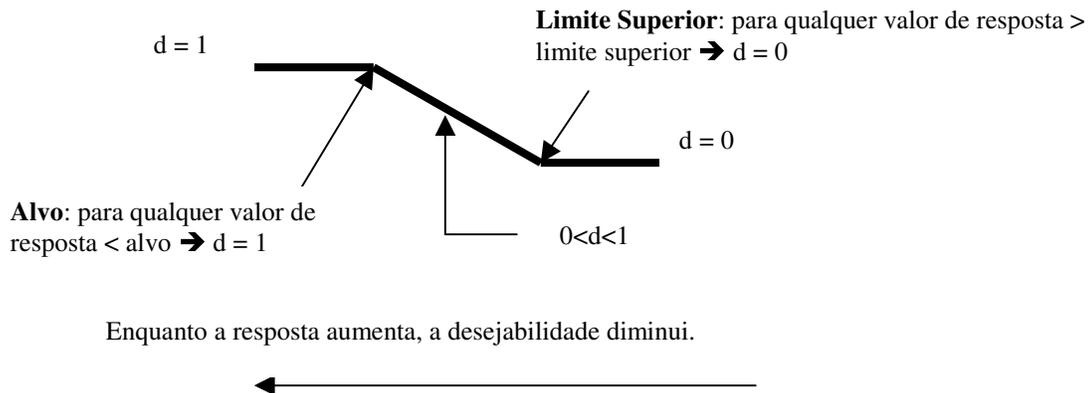


Figura 2.12: Desejabilidade para “quanto menor, melhor”

O formato da função desejabilidade entre o alvo e o limite superior é determinado pela escolha do peso. A figura 2.14 demonstra uma função com peso igual a 1 (reta).

Na função desejabilidade, o peso define o formato da função desejabilidade. Para cada função deve ser escolhido um peso (de 0,1 a 1,0). Quando um peso é menor do que 1, menos ênfase se dá ao alvo, conforme a figura 2.13.

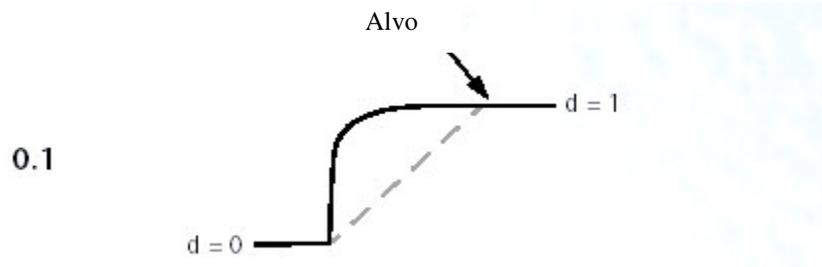


Figura 2.13: Desejabilidade para “peso menor do que 1,0”

Quando o peso é igual a 1, igual importância é dada ao alvo e aos limites, conforme a figura 2.14.

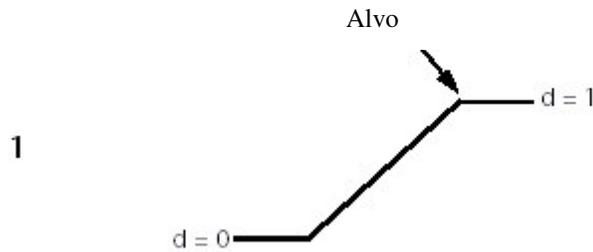


Figura 2.14: Desejabilidade para “peso igual a 1,0”

Se o peso é maior do que 1 (o máximo é 10), mais ênfase é dada ao alvo, conforme a figura 2.15.

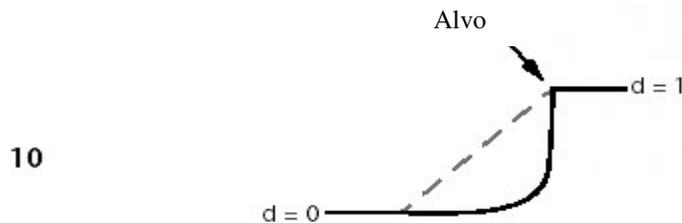


Figura 2.15: Desejabilidade para “peso maior do que 1,0”

O quadro 2.5 a seguir resume as várias situações.

OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
Minimização	A resposta diminui, enquanto que a desejabilidade aumenta. Abaixo do alvo, $d=1$; acima do limite superior, $d=0$.	
Alvo	Quando a resposta se move em direção ao alvo, a desejabilidade aumenta. Acima ou abaixo dos limites, $d=0$; no alvo, $d=1$	
Maximização	A resposta aumenta, enquanto a desejabilidade aumenta. Abaixo do limite inferior, $d=0$; acima do alvo, $d=1$	

Quadro 2.5: Desejabilidade em função do objetivo

Fazendo L_i = limite inferior, T_i = alvo, L_s = limite superior, e considerando Y_i como a função resposta, pode-se definir as seguintes expressões para o cálculo de d_i , segundo DERRINGER et al. (1980):

Se a resposta é o tipo “quanto mais no alvo, melhor”, tem-se que:

$$\begin{aligned} d_i(\hat{Y}_i) &= 0 \quad \text{se } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ d_i(\hat{Y}_i) &= \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^s \quad \text{se } L_i < \hat{Y}_i(x) < T_i \\ d_i(\hat{Y}_i) &= \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_s}{T_i - L_s} \right)^t \quad \text{se } T_i < \hat{Y}_i(x) < L_s \\ d_i(\hat{Y}_i) &= 0 \quad \text{se } \hat{Y}_i(x) > L_s \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.29})$$

Os coeficientes s e T determinam quão importante é o alvo. Se $s=T=1$, a função desejabilidade é uma reta que cresce linearmente em direção ao alvo T_i ; se $s < 1$, $t < 1$, a função é convexa, e se $s > 1$, $T > 1$, a função é côncava.

Se o objetivo for a maximização da resposta, tem-se que:

$$\begin{aligned} d_i(\hat{Y}_i) &= 0 \quad \text{se } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ d_i(\hat{Y}_i) &= \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^s \quad \text{se } L_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ d_i(\hat{Y}_i) &= 1,0 \quad \text{se } \hat{Y}_i(x) > L_s \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.30})$$

Por conseguinte, se o objetivo for a minimização da resposta, usa-se:

$$\begin{aligned} d_i(\hat{Y}_i) &= 1,0 \quad \text{se } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ d_i(\hat{Y}_i) &= \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_s}{T_i - L_s} \right)^s \quad \text{se } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq L_s \\ d_i(\hat{Y}_i) &= 0 \quad \text{se } \hat{Y}_i(x) > L_s \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.31})$$

O processo de solução de um problema de desejabilidade é iterativo e, em geral, baseia-se na maximização de D . A desejabilidade total D é função das desejabilidades individuais d_i ; em função da variável predita Y_i , e Y_i , por sua vez, é função de x_i . Dessa forma, D é função de x_i . O problema reside no fato de se encontrar os valores das variáveis independentes x_i que maximizam D . Existem alguns algoritmos para essa solução. Particularmente, no experimento a ser apresentado, será utilizado o “*Response*

Optimizer” do Minitab®. Entretanto, outros pacotes estatísticos são capazes de realizar estas operações.

Capítulo 3

3 - Solda por ponto, por costura e solda por projeção

3.1 - Fundamentos do processo

Solda por ponto, por costura e solda por projeção são três processos de solda por resistência, onde a união dos metais é produzida pela fusão de uma região específica das superfícies da junta. Esta fusão se dá através do calor gerado pela resistência da junta a passagem da corrente elétrica, sem a adição de material durante a realização da solda (LEE et al., 2004). Uma pressão também é sempre aplicada antes, durante e depois da aplicação da corrente e, em algumas aplicações, para forjar o metal de solda durante o pós-aquecimento. A figura 3.1 ilustra os três processos.

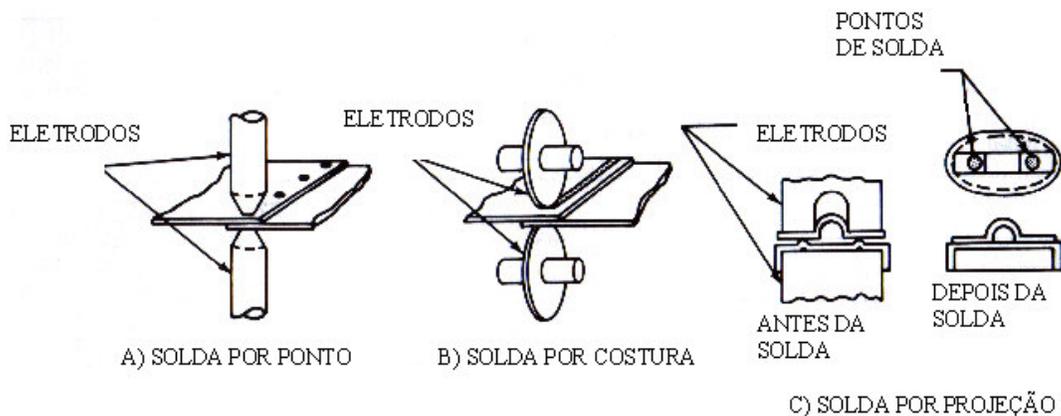


Figura 3.1: Representação dos processos de solda por ponto (A), por costura (B) e por projeção (C)

Na solda por ponto, uma marca de solda é produzida no local de contato com os eletrodos, mas duas ou mais marcas podem ser feitas simultaneamente usando múltiplos pares de eletrodos.

A solda por pontos é usada na fabricação de peças e conjuntos, a partir de chapas metálicas finas, com espessuras de até 3mm, quando o projeto permite o uso de juntas sobrepostas e não há necessidade de estanqueidade da junta. Este processo é usado preferencialmente à junta por parafuso ou rebite, quando a desmontagem para manutenção não é necessária, uma vez que a fabricação se torna mais rápida. É aplicável aos aços carbono, aços inoxidáveis, Al, Cu, Mg, Ni e suas ligas.

A solda por projeção é similar, exceto pela localização das marcas de solda, que é determinada pela projeção ou embosse em uma das superfícies de fusão, ou pela intercessão das partes. Duas ou mais soldas à projeção podem ser realizadas simultaneamente com um mesmo par de eletrodos.

O processo de solda por projeção é usado principalmente para se unirem pequenas peças estampadas, forjadas ou usinadas, possuindo uma ou mais projeções ou saliências. Parafusos, porcas, pinos, etc. podem ser facilmente soldados em uma chapa fina por este processo. Ele é especialmente útil para se produzirem várias soldas simultâneas entre duas peças. A faixa de espessuras na qual é utilizada a solda por projeção é de 0,5 a 3mm, em aços carbonos, aços inoxidáveis e algumas ligas de níquel.

Solda por costura é uma variação da solda à ponto, onde uma série de marcas sobrepostas é produzida para se obter uma solda contínua. Um ou ambos os eletrodos são geralmente circulares, que giram enquanto a junta a ser soldada passa entre eles. Uma solda por costura pode ser produzida com um equipamento de solda à ponto, mas a operação será mais lenta.

A solda por costura é utilizada principalmente para juntas contínuas impermeáveis a gases e líquidos, em aplicações como tanques de combustível para automóveis, extintores de incêndios, fabricação de tubos, etc., na mesma faixa de espessuras citada para a solda por ponto. Entretanto, a solda por costura exige correntes muito maiores que a solda por ponto, já que no primeiro processo uma parcela maior da corrente elétrica circula pela região já soldada.

Uma série de pontos de solda podem ser produzidos por um equipamento de solda por costura e eletrodos circulares através do ajuste da velocidade e do tempo entre as soldas. O movimento da junta pode ou não ser parado durante o ciclo da solda à ponto. Esse procedimento é conhecido como *roll spot welding*.

3.2 - Princípios de operação

A operação da solda por ponto, por costura e solda por projeção envolve a aplicação coordenada de corrente elétrica e pressão mecânica de magnitude e duração apropriadas. A corrente de solda deve passar dos eletrodos para a junta. Sua continuidade é garantida pela força aplicada pelos eletrodos, ou por projeções que são feitas para produzir a densidade de corrente e pressão necessárias (JOU, 2003). A seqüência de operação deve primeiramente gerar calor suficiente para fundir um volume confinado de metal. Esse metal é então resfriado ainda sob pressão até que ele tenha resistência suficiente para segurar a união entre as peças. A densidade de corrente e a pressão devem ser suficientes para que a marca seja formada, mas não excessiva a ponto de expulsar o metal fundido da zona de soldagem (CHANG et al., 2003). A duração da corrente de soldagem deve ser suficientemente curta para evitar a geração de calor excessivo nos eletrodos, reduzindo a sua vida útil (ROWLANDS et al., 2003).

O calor necessário para esse processo de solda por resistência é produzido pela resistência das peças da junta à passagem de uma corrente elétrica. Em virtude do curto caminho a ser percorrido pela corrente elétrica na junta e a limitação de tempo, altas correntes de solda são requeridas para gerar o calor necessário.

3.3 – O Equipamento

O equipamento para solda por resistência deve apresentar três sistemas básicos, sendo: elétrico, mecânico e de controle.

O sistema elétrico consiste de uma fonte de energia, conexões e eletrodos. As fontes de energia elétrica podem ser do tipo “direta” ou “armazenada”, e fornecer corrente contínua ou alternada.

As máquinas de corrente alternada são do tipo direta, sendo que a corrente de soldagem é fornecida diretamente por um transformador monofásico. Sua capacidade é limitada, uma vez que este tipo de equipamento provoca um forte desbalanceamento na rede de distribuição de energia elétrica no momento de sua utilização, além de apresentar um baixo fator de potência (co-seno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente), devido à alta indutância do transformador.

As máquinas de corrente contínua do tipo energia armazenada são baseadas num banco de capacitores, alimentados por uma fonte de tensão contínua, que armazena a energia necessária para a soldagem. Neste tipo de equipamento, o tempo de acumulação é bem maior do que o tempo de descarga. Máquinas do tipo energia direta consistem de um transformador e um circuito retificador trifásico. Estas máquinas demandam um consumo bem menor em kVA da rede de distribuição, podendo ter capacidades muito elevadas.

Os eletrodos são feitos de ligas que têm elevada condutividade térmica e elétrica, geralmente a base de cobre, além de serem resistentes à deformação e ao desgaste, mesmo a temperaturas relativamente elevadas. A geometria dos eletrodos tem grande influência na qualidade da solda produzida e deve ser otimizada para cada aplicação.

O sistema mecânico consiste de um chassi, que suporta o transformador de soldagem e outros componentes dos sistemas elétrico e de controle, e de um dispositivo para fixação das peças e aplicação de pressão.

O dispositivo de aplicação de pressão pode ser acionado manualmente, através de um motor elétrico, ou ainda por dispositivos pneumáticos ou hidráulicos. As máquinas de acionamento manual são usadas normalmente quando a produção é muito variável, devido à facilidade de se alterarem as condições ou parâmetros de soldagem. As máquinas hidráulicas ou pneumáticas são geralmente usadas quando a fabricação é mais ou menos homogênea, podendo ser bastante especializadas para uma determinada tarefa. As máquinas com acionamento por motor elétrico são normalmente usadas quando não se dispõe de ar comprimido perto do local de operação.

A figura 3.2 apresenta um equipamento típico para solda por ponto e por projeção. Para se realizar a solda por costura, é necessária uma máquina que possua eletrodos no formato de roletes, conforme figura 3.3.

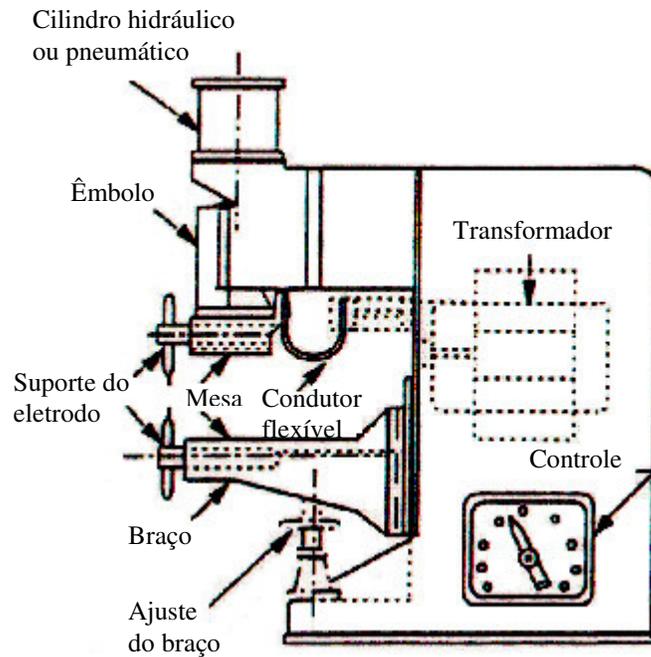


Figura 3.2: Equipamento típico para solda por ponto e por projeção

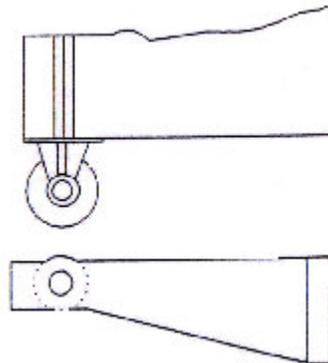
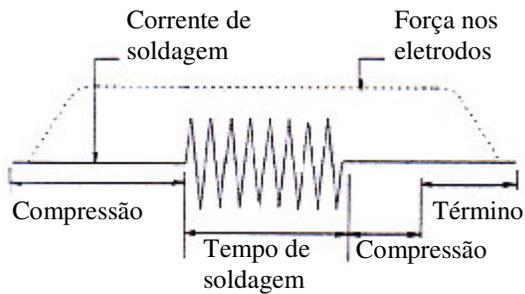


Figura 3.3: Modelo de eletrodo para solda por costura

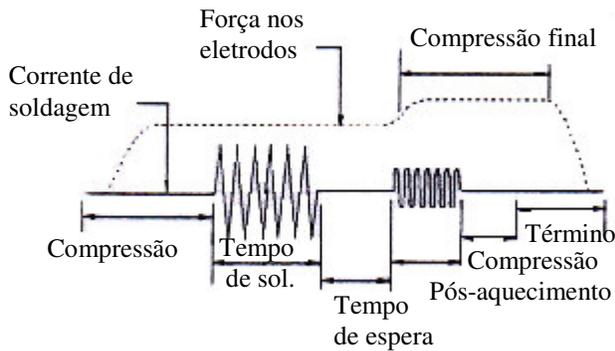
Em trabalhos em série, é muito importante a uniformidade das condições de soldagem. Variações na condição superficial das peças ou na força aplicada podem levar a soldas inaceitáveis. Assim, por exemplo, condições adequadas para soldagem de peças que apresentam oxidação superficial possivelmente não poderão ser usadas na montagem de peças com a superfície limpa, com os mesmos resultados.

A escolha dos parâmetros de soldagem é feita em função do material e da espessura das peças a serem unidas. Algumas tabelas com parâmetros típicos de soldagem para diversas situações podem ser encontradas na literatura.

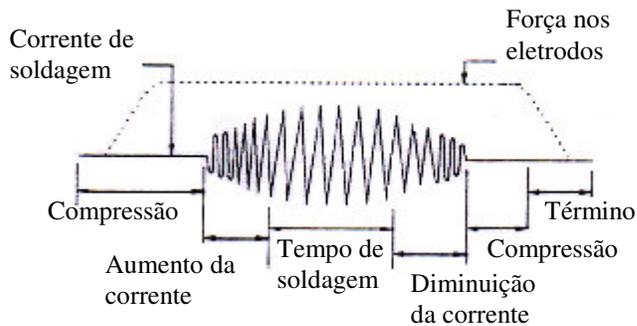
A figura 3.4 apresenta os tipos mais comuns de ciclos de soldagem para máquinas de solda por ponto e solda por projeção.



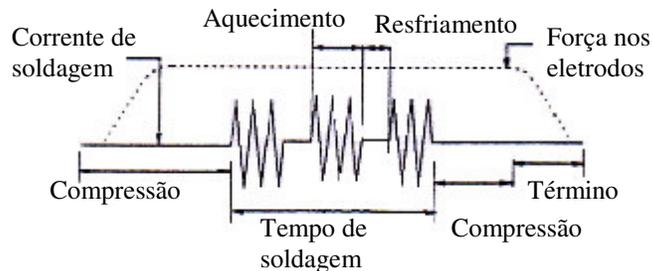
Ciclo de soldagem com impulso único



Ciclo de soldagem com impulso único e pós aquecimento



Ciclo de soldagem com impulso único e aumento e diminuição gradativas da corrente de soldagem



Ciclo de soldagem com impulsos múltiplos

Figura 3.4: Diferentes ciclos de solda por ponto e por resistência

3.4 - Geração de calor

Em um condutor elétrico, a quantidade de calor gerado depende de três fatores:

- (1) a amperagem
- (2) a resistência do condutor (incluindo a resistência do contato).
- (3) a duração da corrente

Esses três fatores afetam a geração de calor conforme expressado na fórmula.

$$Q = I^2 R t$$

onde:

Q = Calor gerado, joules

I = Corrente, Ampéres

R = Resistência da junta, ohms

t = Duração da corrente, segundos

O calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de solda e diretamente proporcional à resistência e ao tempo. Parte do calor gerado é usado para fazer a solda e parte é perdido por dissipação no metal.

A corrente de soldagem necessária para produzir a solda desejada é aproximadamente inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo. Portanto, se o tempo é extremamente curto, a corrente necessária deverá ser bem alta. Uma combinação de alta corrente e tempo insuficiente pode produzir uma distribuição indesejável de calor na região onde a solda será realizada, resultando em uma fusão excessiva na superfície e uma rápida deterioração do eletrodo.

O circuito secundário de uma máquina de solda por resistência e a junta a ser soldada constituem uma série de resistências. A resistência total desse conjunto afeta a intensidade da corrente elétrica. A corrente será a mesma em todas as partes do circuito, independentemente da resistência em cada local do circuito, mas o calor gerado em cada local do circuito será diretamente proporcional à resistência nesse ponto útil (ROWLANDS et al., 2003).

Uma característica importante da solda por resistência é a rapidez com que o calor da soldagem pode ser produzido. A distribuição da temperatura na junta e nos eletrodos, no caso da solda por ponto, por costura e por projeção, é ilustrada na figura 3.5.

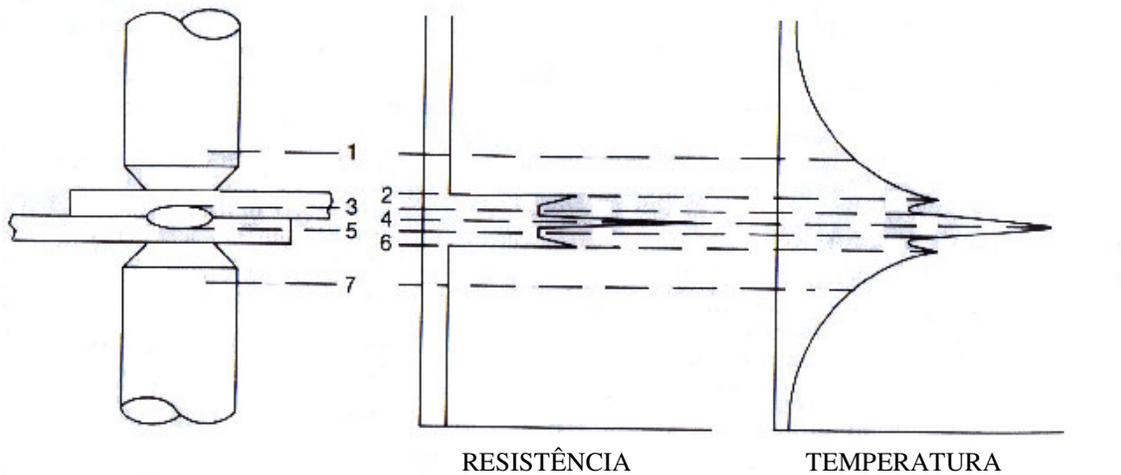


Figura 3.5: Distribuição da resistência e do calor nas diferentes regiões do ponto de solda

Existem, de fato, pelo menos sete resistências conectadas em série em uma solda, que devem ser consideradas para a distribuição de calor. Para uma junta de duas espessuras, a distribuição é a seguinte:

- (1) 1 e 7, é a resistência elétrica do material dos eletrodos.
- (2) 2 e 6, é a resistência do contato entre o eletrodo e a base do metal. A magnitude dessa resistência depende da condição da superfície da base do metal e do eletrodo, do tamanho e do contorno da face do eletrodo, e da força do eletrodo. (a resistência é inversamente proporcional à força de contato). Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície da base do metal não deve alcançar a temperatura de fusão durante a passagem da corrente, devido a alta condutividade térmica dos eletrodos (1 e 7) e ao fato de que eles são usualmente refrigerados com água.
- (3) 3 e 5, é a resistência total do metal propriamente, que é diretamente proporcional à sua resistividade e espessura, e inversamente proporcional à área da seção por onde a corrente irá passar.
- (4) 4, é a resistência na interface dos metais, no local onde a solda deve ser formada. Esse é o ponto de maior resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor. Como o calor também é gerado nos pontos 2 e 6, o calor gerado na interface 4 não é imediatamente dissipado pelos eletrodos.

O calor é gerado em todos esses lugares e não apenas na interface. O fluxo do calor na interface dos metais é governado pelo gradiente da temperatura estabelecido pela resistência dos vários componentes do circuito.

O calor será gerado em cada um dos locais descritos na figura 3.2, na proporção da resistência de cada um desses locais. Entretanto, o calor de soldagem é necessário apenas na interface dos metais, e o calor gerado nas demais regiões deveria ser minimizado. Como a maior resistência está localizada na região 4, o calor é mais rapidamente desenvolvido nessa região. As próximas regiões de menor resistência são as de número 2 e 6. A temperatura cresce rapidamente nessas regiões também, mas não tão rápido como na região 4. Após aproximadamente 20% do tempo de solda, o gradiente de calor será conforme o apresentado na figura 3.2. O calor gerado nas regiões 2 e 6 é rapidamente dissipado através do sistema de refrigeração dos eletrodos nas regiões 1 e 7. O calor gerado na região 4 é mais lentamente dissipado através dos metais da junta. Dessa forma, enquanto a corrente de soldagem passa pela junta, a taxa da

temperatura na região 4 cresce mais rapidamente do que nas regiões 2 e 6. A temperatura de soldagem é indicada na figura 3.5.

3.5 - A solda por projeção

A solda por projeção é primeiramente usada para unir peças estampadas, forjadas ou usinadas a outras peças. Uma ou mais projeções são produzidas nas peças durante as operações de formar. Parafusos ou outros elementos de fixação como porcas e pinos podem ser soldados à projeção a uma peça de metal, conforme demonstrado na figura 3.6.

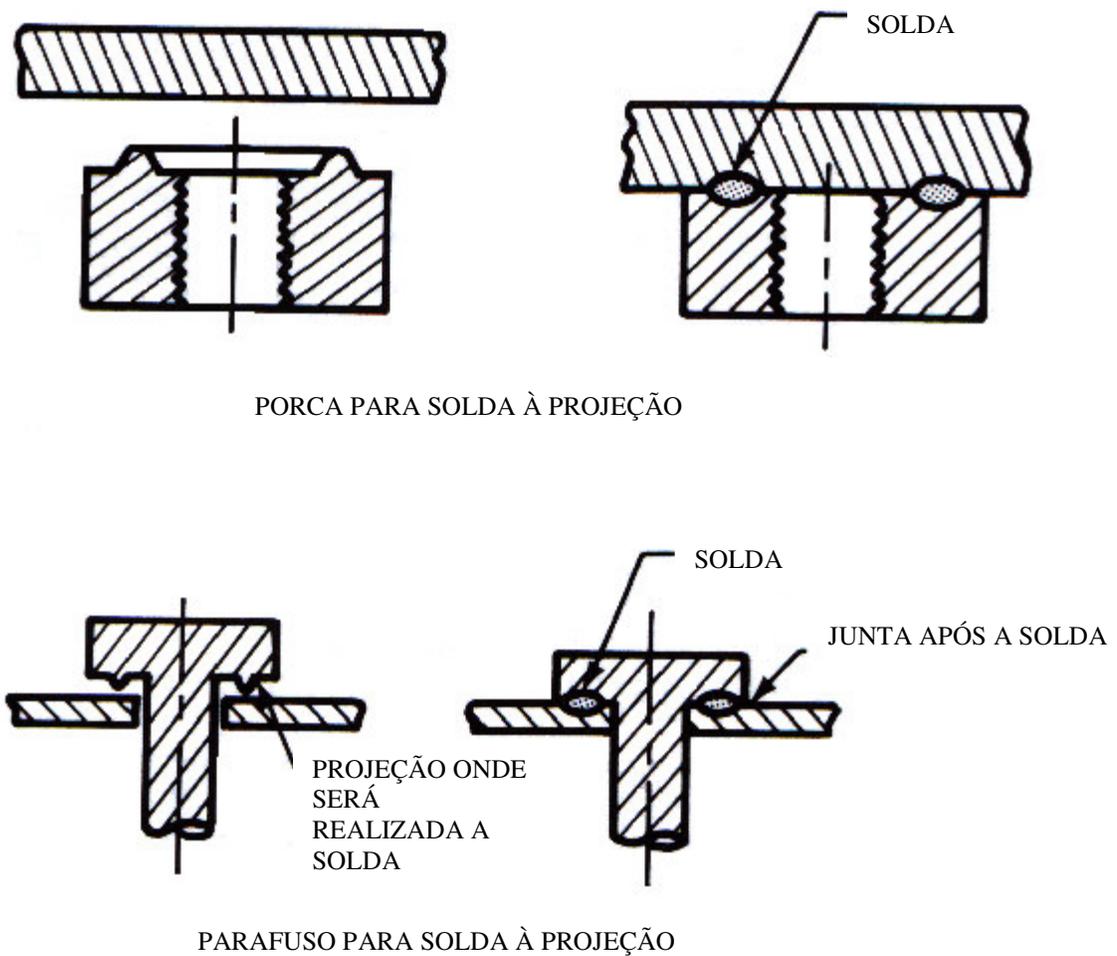


Figura 3.6: Solda à projeção

A solda por projeção é especialmente útil para gerar vários pontos de solda simultaneamente entre duas peças. A marcação de uma das peças pode ser minimizada colocando as projeções na outra peça.

Além das características relacionadas ao equipamento, outras considerações devem ser levadas em conta no momento de desenvolver o processo de solda por resistência, são eles: a geometria das projeções e dos eletrodos, incluindo o sistema de refrigeração dos mesmos.

3.5.1 - Vantagens e limitações

Em geral, a solda por projeção pode ser usada nas mesmas aplicações da solda por ponto para unir pequenas peças entre si e a peças maiores. A seleção de um método sobre o outro depende de fatores econômicos, vantagens e limitações dos dois processos. As principais vantagens da solda por projeção inclui o seguinte:

- (1) Um número de soldas pode ser feito simultaneamente em apenas um ciclo de soldagem da máquina. A limitação quanto ao número de soldas está relacionado a habilidade de aplicar uniformemente a força no eletrodo e a corrente de soldagem em cada projeção.
- (2) Menor sobreposição e diminuição do espaço entre as soldas, porque a corrente fica concentrada nas projeções, e o efeito nas adjacências da solda não é um problema.
- (3) Amplitude de espessuras de no mínimo 6 para 1 são possíveis, em virtude da flexibilidade de tamanho e posição das projeções. As projeções geralmente são colocadas na peça mais espessa.
- (4) As soldas por projeção podem ser posicionadas com maior precisão e consistência em relação a solda por ponto, e as soldas são geralmente mais consistentes em virtude da uniformidade das projeções. Como resultado, uma solda por projeção pode ser de um tamanho menor do que uma solda por ponto.
- (5) A solda por projeção geralmente tem uma melhor aparência, no lado oposto à projeção, em relação ao acabamento da solda por ponto. A maior parte da

deformação e o maior aumento da temperatura ocorre na peça que contém as projeções, deixando a outra parte relativamente fria e livre de deformações, particularmente na superfície exposta.

- (6) São usados eletrodos maiores e de face plana; conseqüentemente, o manuseio do eletrodo é menor do que o necessário para a solda por ponto, reduzindo os custos de manutenção.
- (7) Óleo, impurezas e proteções superficiais causam menos problemas do que na solda por ponto, porque a ponta das projeções tendem a retirar os materiais estranhos no início do ciclo de soldagem; de qualquer forma, a qualidade da solda será melhor em superfícies limpas.

As maiores limitações da solda por projeção são:

- (1) A confecção das projeções geralmente exigem uma operação adicional.
- (2) Para múltiplas soldas, controles precisos da altura das projeções e o alinhamento preciso das ferramentas de soldagem são necessários para a força nos eletrodos e a corrente de soldagem.
- (3) Para chapas de aço, o processo é limitado a espessuras onde as características aceitáveis das projeções podem ser formadas, necessitando também de equipamentos específicos.
- (4) Múltiplas soldas podem ser feitas simultaneamente, o que requer equipamentos com maiores capacidades do que os usados na solda por ponto. Isso também limita o tamanho do componente que contém as projeções.

Capítulo 4

4 – Pesquisa experimental

4.1 - Introdução

Neste capítulo será apresentada a aplicação dos conceitos de planejamento e análise de experimentos descritos no capítulo 2 em um processo de solda por projeção, processo esse descrito no capítulo 3.

O objetivo desse capítulo é descrever como os experimentos industriais foram realizados, as dificuldades encontradas pela equipe que realizou os ensaios e como foram determinados os principais parâmetros de controle e os níveis de regulação para o processo em questão. Os experimentos foram realizados em uma empresa localizada na cidade de Cruzeiro / SP, por uma equipe multifuncional que contou com a participação de representantes das seguintes áreas:

- Engenharia da Qualidade
- Engenharia de Solda
- Coordenação de Produção
- Produção

Todo o processo de planejamento, ensaios e análise dos resultados ocorreu no período de Junho de 2003 a Abril de 2004.

4.2. A empresa

A empresa onde os experimentos foram realizados é de grande porte, de capital fechado, com mais de 60 anos de história. Outro fato marcante com relação a empresa onde os experimentos foram realizados, é que ela é a portadora da maior prensa do hemisfério sul do planeta, com capacidade de 5.200 toneladas em uma mesa de 12 metros de comprimento. Essa empresa atua no setor automotivo desde 1958, como fornecedora de estampados, chassis e rodas para caminhões e automóveis, sendo esse o seu principal negócio hoje, tanto no mercado nacional como nas suas exportações.

A empresa atua no desenvolvimento, fabricação, montagem e comercialização de produtos estruturais para a indústria automotiva, a saber: rodas, longarinas, travessas, conjuntos soldados, chassis e estampados em geral.

A empresa vem continuamente investindo em novos equipamentos, na melhoria de suas instalações, no treinamento de seus funcionários e na melhoria da qualidade de seus produtos. Uma prova disso é o seu pioneirismo na conquista do certificado ISO 9001 para a linha de rodas em 1990 – foi a primeira empresa nacional do setor automotivo a conquistar este certificado.

Atualmente, a empresa se encontra na vanguarda de seu setor, com as certificações: ISO 9000/2000; ISO 14000 e ISO TS 16949/2002.

4.3. Definição do produto a ser estudado

Outra definição que se faz necessária diz respeito a definição do produto que deveria ser ensaiado. Nesta atividade as seguintes informações foram consideradas:

- A flexibilidade do processo de fabricação, que permitiria a realização dos experimentos planejados sem afetar o planejamento de produção da empresa;
- O índice de ocorrência de problemas, onde a empresa enfrenta problemas de qualidade de fabricação de alguns processos, que geram perdas e problemas nos clientes;

- Se ao aplicar as técnicas de planejamento e análise de experimentos industriais, os custos decorrentes da má qualidade do produto são reduzidos.

Analisando as informações descritas acima, fica claro que o estudo deverá ser direcionado para a Engenharia de Processo da empresa, ou seja, o objetivo principal seria melhorar as características de qualidade de um dos processos de fabricação. Mais especificamente, foi selecionado o processo de solda à projeção, por ser considerado um processo crítico, com grande índice de problemas e com uma vasta variedade de produtos para que se possa explorar as melhorias advindas do processo de planejamento e análise de experimentos.

Estudos realizados por CHEN & LIU (1999) comprovam que se os parâmetros de controle de um determinado processo de fabricação são definidos de forma equivocada, podem ocorrer perdas de qualidade e problemas nos ferramentais.

Entre os produtos, foi selecionado o “suporte do limitador da cabine”, peça que já apresentou vários problemas de qualidade decorrentes do processo de solda por projeção. As figuras 4.1 e 4.2 ilustram respectivamente o produto que será utilizado nos experimentos industriais e os seus componentes.



Figura 4.1: Produto selecionado para o estudo de caso

Na fabricação dessa peça são utilizados três componentes, sendo:

- um suporte estampado
- duas porcas específicas para solda à projeção



Figura 4.2: Componentes do suporte do limitador da cabine

Dentre os problemas conhecidos desse produto, os de maior importância são a falta de resistência da solda e a obstrução da rosca. A falta de resistência da solda gera a quebra da própria solda, comprometendo a utilização do produto pelo cliente. No caso da obstrução da rosca, esse defeito pode ser causado por deformação no filete de rosca em virtude da corrente de solda ou por vazamento do metal fundido para dentro da rosca.

O processo de solda por projeção é realizado em uma máquina de solda por resistência da marca SIMONEK modelo PR 150 AR, com capacidade de até 150KVA de potência, conforme apresentado na figura 4.3. O posicionamento das peças é realizado pelos eletrodos que são confeccionados especificamente para as dimensões do estampado e da porca (espessuras e diâmetros).

A produção desse item é de aproximadamente 600 unidades por semana, dessa forma, a produção não é realizada todos os dias, permitindo assim a realização dos experimentos sem que se comprometesse o planejamento de produção.



Figura 4.3: Equipamento utilizado no experimento

4.4 – A definição das variáveis do processo

No capítulo anterior foram apresentadas algumas variáveis do processo de solda por resistência – mais especificamente, solda por projeção – que interferem na qualidade da solda em si. Sendo estes fatores passíveis de controle, a aplicação da técnica Projeto e Análise de Experimentos pode auxiliar na obtenção de uma solda com melhor qualidade e menor utilização de recursos.

Durante a análise do processo de solda por projeção das porcas do suporte limitador da cabine, foi possível identificar vários fatores relacionados ao experimento, sendo:

- Pressão da linha de ar comprimido
- Geometria das projeções
- Geometria dos eletrodos
- Composição química da peça estampada
- Composição química das porcas

- Espessura da junta
- Potência de soldagem
- Tipos de ciclos de soldagem
- Corrente de soldagem
- Tempo de soldagem
- Tensão de soldagem
- Tempo pós soldagem

Dentre os fatores citados acima, foram considerados como sendo de ruído ou constantes os seguintes:

- Geometria das projeções
- Geometria dos eletrodos
- Composição química da peça estampada
- Composição química das porcas
- Espessura da junta
- Tipos de ciclos de soldagem
- Corrente de soldagem
- Tensão de soldagem

Dessa forma, os fatores que foram considerados diretamente relacionados com o resultado desejado e, portanto, analisado durante os experimentos são:

- Pressão da linha de ar comprimido
- Potência de soldagem
- Tempo de soldagem
- Tempo pós soldagem

4.5 – O experimento

Apesar dos experimentos diferirem em seus objetivos e montagem física, existem certas ações e regras aplicáveis, praticamente, a qualquer experimento. Um experimento deve conter pelo menos as seguintes etapas:

- planejamento;
- execução;
- processamento;
- análise e documentação.

4.5.1 - Planejamento

A formulação do problema é o ponto de partida para o planejamento da experimentação. Dessa forma, o problema pode ser formulado como a busca da melhoria da qualidade da solda por projeção, através da análise do comportamento e influência dos fatores: pressão da linha, potência de soldagem, tempo de soldagem e tempo pós soldagem.

Diante deste cenário, algumas definições se fizeram necessárias. A primeira dizia respeito a escolha das variáveis de resposta do processo analisado. A preocupação com a qualidade da solda é o ponto de partida.

Para CAMPOS (1992), qualidade é vista sob cinco dimensões, descritas a seguir:

- qualidade (medida de característica);
- custo;
- entrega;
- moral;
- segurança.

A qualidade da solda foi definida sobre duas destas dimensões: qualidade e custo. Estas duas dimensões permitem que a qualidade da solda seja analisada sob quatro aspectos:

- Resistência da solda medida através de esforço mecânico aplicado à junta com o auxílio de um torquímetro;
- Economia de energia elétrica e preservação dos eletrodos medidos através da corrente consumida durante a realização da solda;
- Ausência de vazamento do metal fundido da região de soldagem verificada visualmente após a realização da solda.
- Ausência de deformação nos filetes de rosca medida através de calibrador do tipo Passa Não Passa.

Assim, resistência da solda, corrente elétrica, vazamento do metal fundido e deformação da rosca foram definidas como variáveis de resposta do processo analisado. Desse modo, a maior resistência da solda, a menor corrente, a ausência de vazamento e a ausência de deformação na rosca apontam para uma solda de melhor qualidade.

O projeto de experimento a ser usado precisou também ser definido. Adotou-se um Planejamento Fatorial do tipo 2^4 . Com o objetivo de determinar a significância estatística dos resultados observados, foi previsto também a replicagem da experimentação por mais uma vez, resultando deste modo num total de 32 tratamentos a serem realizados.

Adotado o projeto do experimento, precisou-se estabelecer os níveis nos quais os fatores foram ensaiados. Estes níveis foram determinados em função de indicações do fabricante do equipamento e de alguns testes preliminares executados. Partindo destas informações, foram estabelecidos os níveis superior e inferior para os fatores, de acordo com o quadro 4.1.

Fator	Nível inferior (-)	Nível superior (+)
Pressão da linha	3 Kgf/cm ²	4 Kgf/cm ²
Potência de solda	35 %	45 %
Tempo de solda	1 ciclo	4 ciclos
Tempo pós solda	10 ciclos	20 ciclos

Quadro 4.1: Fatores e seus respectivos níveis

Dessa forma, estaremos trabalhando com as seguintes escalas:

- Kgf/cm² para o torque;
- % para a potência (referente ao percentual do valor nominal do equipamento, que é de 150 KVA);
- Ciclos para os tempos de solda e pós solda (um ciclo equivale a 1/60 segundos).

No planejamento também foram previstos instrumentos de medição necessários a realização dos experimentos, sendo:

- Torquímetro
- Calibrador tipo Passa Não Passa para a rosca
- Amperímetro

4.5.2 - Execução

Conforme definido anteriormente, será realizado um experimento fatorial completo com uma replicação, dessa forma, é necessária a geração de uma matriz de experimentos para as 32 combinações.

A primeira coluna apresenta a ordem padrão dos experimentos definida pelo software MINITAB.

A segunda coluna define a ordem em que cada experimento deve acontecer.

As demais colunas se referem aos dados de entrada do projeto de experimento, a saber:

- Pressão da linha de ar comprimido
- Tempo de solda
- Porcentagem da potência nominal da máquina
- Tempo de retenção (pós solda)

Também nessa mesma matriz já estão definidos os campos onde o resultado dos experimentos deverão ser lançados, a saber:

- Torque
- Calibre Passa Não Passa
- Respingo
- Corrente

Definida as variáveis, seus limites superior e inferior para o experimento e gerada a matriz de experimentos, iniciou-se o trabalho de coleta de dados. Após a realização da solda de cada porca, os dados eram coletados e anotados na matriz de experimento da seguinte forma:

- 1 – Leitura da corrente no painel do equipamento
- 2 – Inspeção visual da ausência de respingo de solda
- 3 – Inspeção da deformação da rosca com o calibre do tipo Passa Não Passa
- 4 – Inspeção de resistência da solda a aplicação de torque

Após a coleta, os dados do experimento foram lançados na matriz de planejamento anteriormente gerada pelo software MINITAB, ficando essa matriz conforme demonstrado na Quadro 4.2.

Ordem padrão	Ordem de corrida	Pressão da linha	Tempo de solda	Potência	Retenção	Torque	Pnp	Respingo	Corrente
5	1	3	1	45	10	105	0	1	24,3
19	2	3	4	35	10	136	1	1	21,3
17	3	3	1	35	10	61	1	1	21,2
32	4	4	4	45	20	152	1	0	26,1
3	5	3	4	35	10	140	1	1	22,0
8	6	4	4	45	10	145	0	0	26,0
28	7	4	4	35	20	96	1	1	22,8
23	8	3	4	45	10	145	0	0	24,4
4	9	4	4	35	10	115	0	1	21,7
22	10	4	1	45	10	76	0	1	26,6
20	11	4	4	35	10	26	1	1	21,9
9	12	3	1	35	20	58	1	1	21,4
30	13	4	1	45	20	77	1	1	25,6
29	14	3	1	45	20	97	0	1	24,4
13	15	3	1	45	20	103	0	1	24,6
14	16	4	1	45	20	81	1	1	26,3
26	17	4	1	35	20	16	1	1	22,0
21	18	3	1	45	10	97	0	1	24,9
31	19	3	4	45	20	161	0	0	26,1
15	20	3	4	45	20	146	0	0	26,3
24	21	4	4	45	10	131	0	0	25,7
27	22	3	4	35	20	120	0	1	22,6
25	23	3	1	35	20	42	1	1	21,6
11	24	3	4	35	20	124	0	1	22,6
7	25	3	4	45	10	132	0	0	24,5
1	26	3	1	35	10	54	1	1	20,9
18	27	4	1	35	10	14	1	1	21,5
16	28	4	4	45	20	152	0	0	26,6
2	29	4	1	35	10	24	1	1	21,4
12	30	4	4	35	20	105	1	1	23,1
6	31	4	1	45	10	80	0	1	26,8
10	32	4	1	35	20	21	1	1	22,4

Quadro 4.2: Matriz de planejamento com o resultado dos ensaios

As respectivas unidades de medida para os fatores de controle já foram definidas, para as respostas serão:

- Torque em Nm
- Calibre Passa Não Passa será 1 para peça aprovada e 0 para peça reprovada
- Respingo será 1 para peça aprovada e 0 para peça reprovada
- Corrente em KA

4.5.3 - Processamento

Com esses dados, realizou-se a primeira bateria de cálculos e gráficos. O objetivo nesse momento era verificar o comportamento do processo e iniciar a elaboração das equações para cada resposta, porém, foram observados pontos de não aleatoriedade tanto para o torque como para o gráfico do calibre Pnp. Esses pontos de não aleatoriedade estão demonstrados a seguir. Vale lembrar que os resultados para o torque são variáveis contínuas e no caso do Pnp são variáveis discretas.

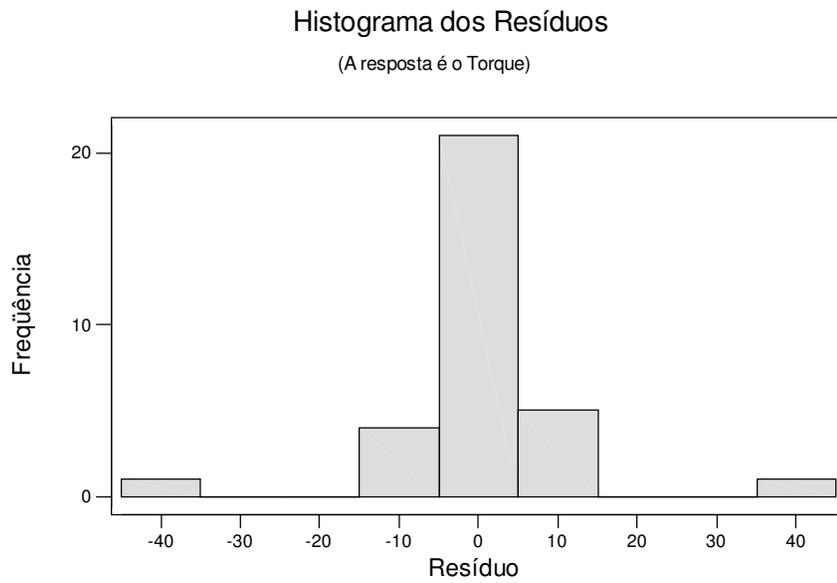
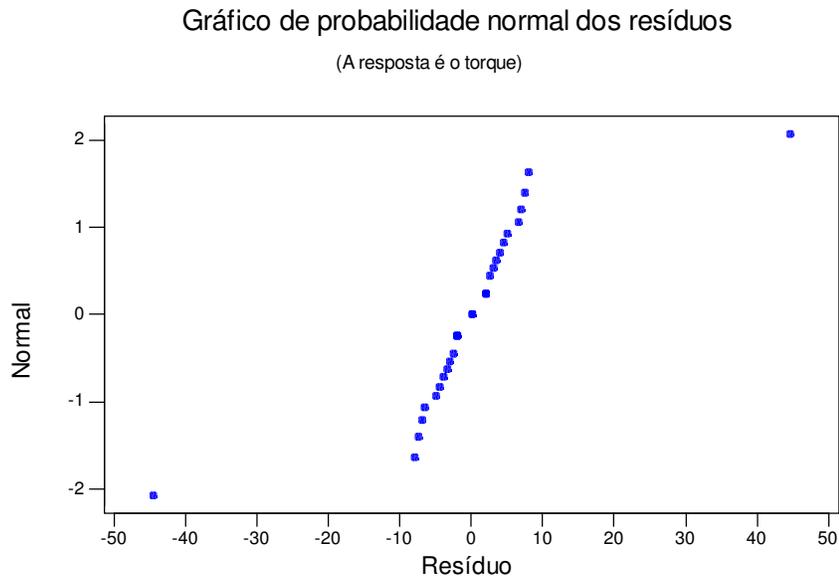


Figura 4.4: Gráficos de probabilidade normal e histograma para o torque

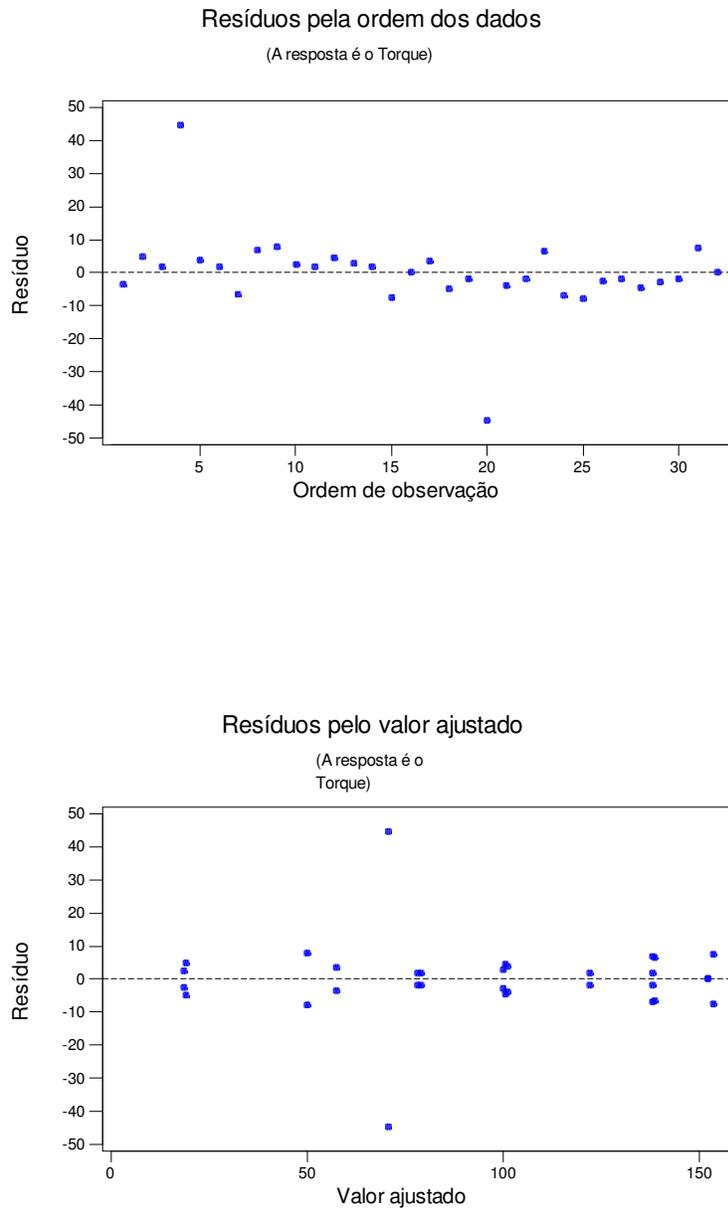


Figura 4.5: Gráficos de resíduos com valor ajustado e ordem dos dados para o torque

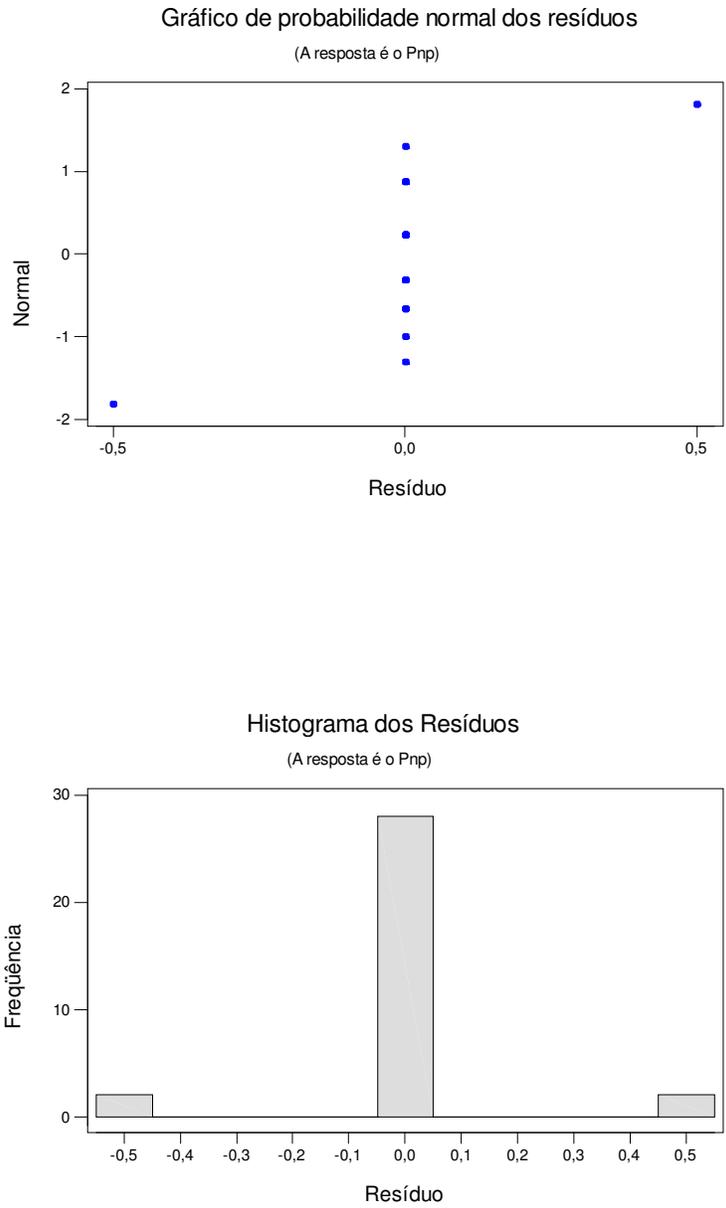


Figura 4.6: Gráficos de probabilidade normal e histograma para o Pnp

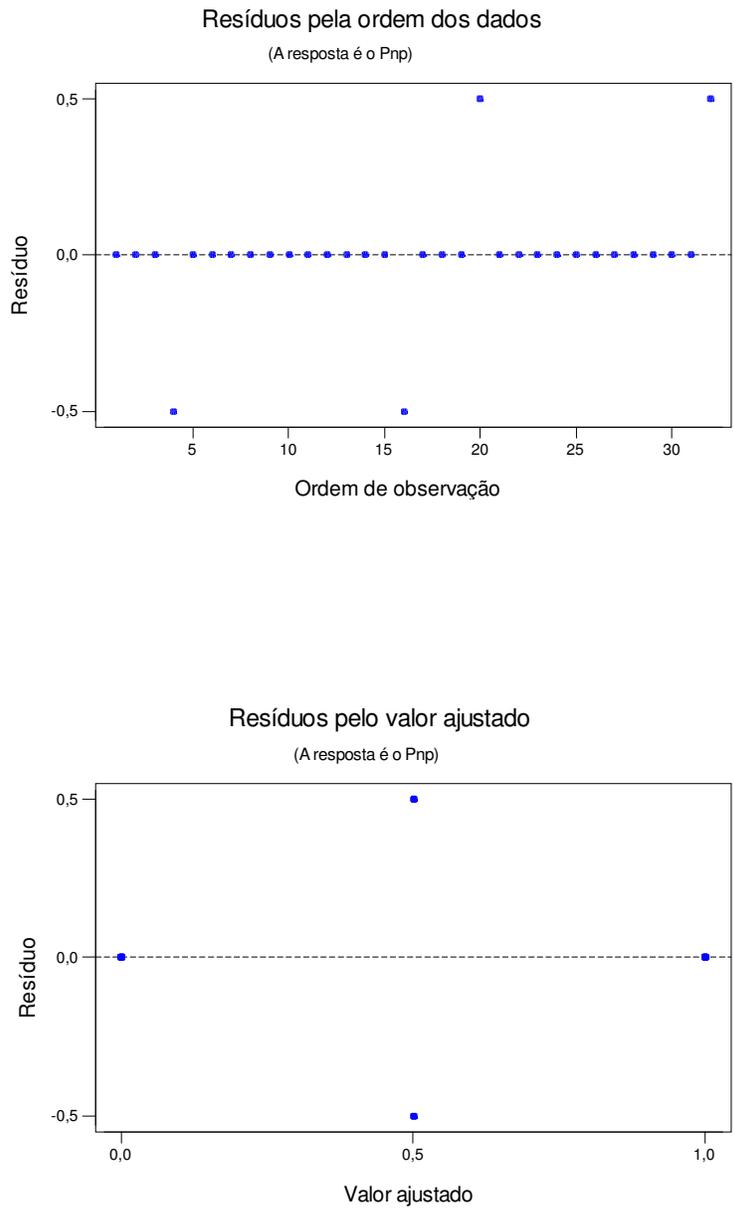


Figura 4.7: Gráficos de resíduos com valor ajustado e ordem dos dados para o Pnp

As não aleatoriedades demonstradas nos gráficos 4.4 e 4.5 estão localizadas nos pontos 4 e 20 para o torque e nos pontos 4, 16, 20 e 32 para o Pnp.

Em virtude disso, esses experimentos foram refeitos até que nenhuma outra não aleatoriedade existisse, sendo então os valores substituídos na matriz de planejamento, conforme demonstrado na quadro 4.3.

Exp.	Pressão da linha	Tempo de solda	Potência	Retenção	Torque	Pnp	Respingo	Corrente
4	4	4	35	10	31	1	1	21,5
16	4	4	45	20	149	0	0	26,4
20	4	4	35	10	43	1	1	21,2
32	4	4	45	20	157	0	0	25,9

Quadro 4.3: Linhas corrigidas na matriz de planejamento

Eliminadas as não aleatoriedades, iniciou-se o trabalho de análise dos gráficos e dos cálculos gerados pelo programa, objetivando inicialmente definir as equações que regem o comportamento de cada uma das saídas em estudo.

No capítulo seguinte serão apresentadas as análises para cada saída, iniciando pelo torque, depois calibre Passa Não Passa, respingo e finalmente corrente.

Capítulo 5

5 - CONCLUSÃO

5.1 – Resultados

Neste tópico, além da apresentação dos resultados obtidos (cálculos, gráficos e equações), será também realizada a sua análise.

5.1.1 – Resultados para a resistência ao torque

Para definir a equação que rege o comportamento do torque em função das variáveis de entrada e as suas interações, deve-se encontrar os coeficientes para cada elemento da equação, bem como a sua variação.

Esses resultados são facilmente identificados pelo programa MINITAB, sendo expressos nas colunas “*Coef*” e “*SE Coef*”. Porém, deve-se tomar o cuidado de considerar apenas os coeficientes que realmente interferem no resultado do torque. Isso pode ser verificado através do índice “*P*” (*P- Value*) que não pode ser superior a 0,05.

Fazendo a análise dos dados apresentados no quadro 5.1 pode-se definir a equação para o torque.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		92,72	1,199	77,31	0,000
Pressão	-29,69	-14,84	1,199	-12,38	0,000
Tempo de	59,69	29,84	1,199	24,88	0,000
Potência	49,81	24,91	1,199	20,77	0,000
Retenção	8,69	4,34	1,199	3,62	0,002
Pressão*Tempo de	-1,19	-0,59	1,199	-0,50	0,627
Pressão*Potência	18,44	9,22	1,199	7,69	0,000
Pressão*Retenção	11,06	5,53	1,199	4,61	0,000
Tempo de*Potência	-3,44	-1,72	1,199	-1,43	0,171
Tempo de*Retenção	10,69	5,34	1,199	4,46	0,000
Potência*Retenção	-1,19	-0,59	1,199	-0,50	0,627
Pressão*Tempo de*Potência	11,94	5,97	1,199	4,98	0,000
Pressão*Tempo de*Retenção	8,81	4,41	1,199	3,67	0,002
Pressão*Potência*Retenção	-10,56	-5,28	1,199	-4,40	0,000
Tempo de*Potência*Retenção	-3,19	-1,59	1,199	-1,33	0,203
Pressão*Tempo de*Potência*Retenção	-9,31	-4,66	1,199	-3,88	0,001

Quadro 5.1: Índices para o torque

$$\text{Torque} = 92,72 - 14,84*PL + 29,84*TS + 24,91*PO + 4,34*RE + 9,22*PL*PO + 5,53*PL*RE + 5,34*TS*RE + 5,97*PL*TS*PO + 4,41*PL*TS*RE - 5,28*PL*PO*RE - 4,66*PL*PO*TS*RE$$

Onde:

PL = Pressão da linha

TS = Tempo de solda

PO = Potência

RE = Retenção

Não se pode esquecer que cada um desses fatores pode também variar segundo o desvio padrão apontado no cálculo, que para esse caso é de 1,199.

Pode-se também analisar graficamente o comportamento do torque em função das variáveis e suas interações observando os gráficos das figuras 5.1 e 5.2.

Os efeitos principais que mais influenciam o resultado do torque são o tempo de solda e a potência, que conforme são aumentados do valor -1 (1) para o valor +1 (4) o torque também aumenta. Quanto à pressão, é possível observar que o seu efeito no resultado do torque não tem a mesma intensidade do tempo de solda e da potência, mas a novidade aí é que o sentido desse efeito é inverso, ou seja, quando variamos do valor -1 (3) para +1 (4) a resistência da solda ao torque diminui.

Gráfico dos efeitos principais para o Torque

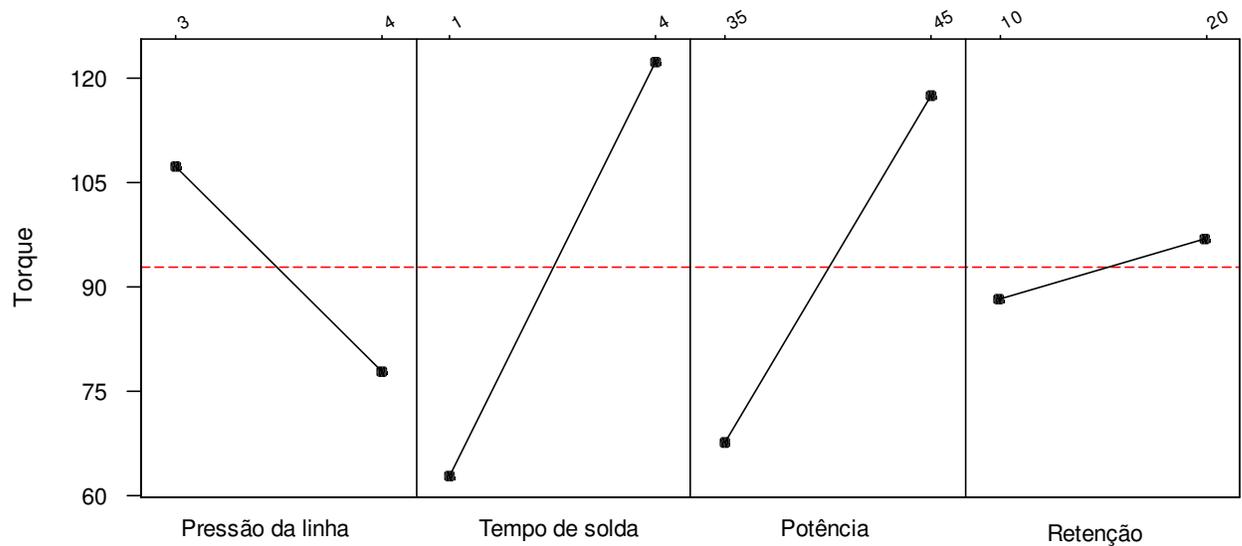


Figura 5.1: Efeito principal para o torque

Neste primeiro gráfico é possível observar que, apesar da pressão ser uma variável importante para a definição do próprio processo de solda por projeção, o seu valor não pode ser elevado, pois prejudica o desempenho da junta quanto à resistência ao torque.

Além da influência da pressão, é possível observar que os fatores que mais influenciam o desempenho da solda no ensaio de torque são o tempo de solda e a potência.

Gráficos dos efeitos de interação para o Torque

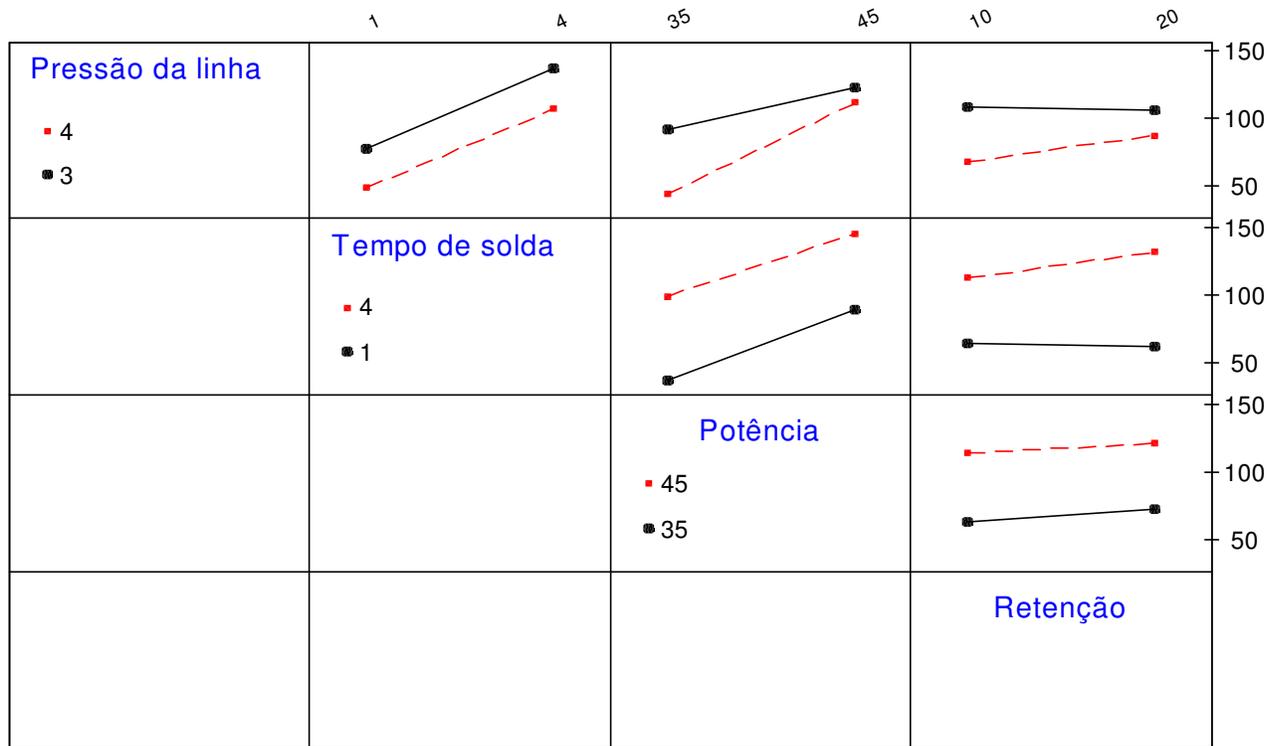


Figura 5.2: Efeitos de interação para o torque

5.1.2 – Resultados para a ausência de respingo

Da mesma forma como realizou-se a análise dos dados e gráficos para o torque, pode-se definir a equação para o respingo baseado nos dados do quadro 5.2 e nos gráficos das figuras 5.3 e 5.4.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0,7500	0,000000	*	*
Pressão	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Tempo de Potência	-0,5000	-0,2500	0,000000	*	*
Retenção	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Potência	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Retenção	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Tempo de*Potência	-0,5000	-0,2500	0,000000	*	*
Tempo de*Retenção	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Potência*Retenção	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de*Potência	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de*Retenção	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Potência*Retenção	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Tempo de*Potência*Retenção	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de*Potência* Retenção	0,0000	0,0000	0,000000	*	*

Quadro 5.2: Índices para o respingo

Gráfico dos efeitos principais para Respingo

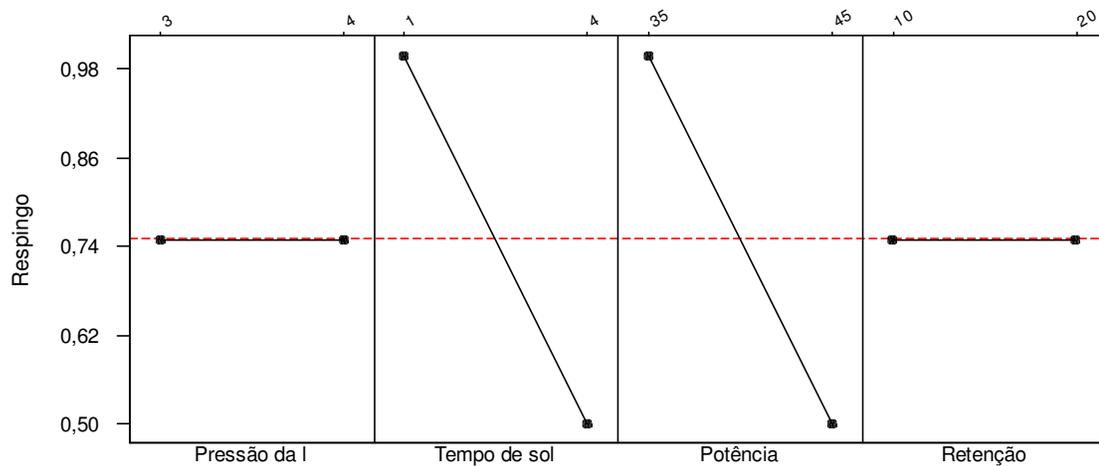


Figura 5.3: Efeito principal para a ausência de respingo

Analisando os gráficos da figura 5.3 é possível observar que os fatores que mais influenciam a ocorrência de respingos para este processo são o tempo de solda e a potência. A pressão e o tempo pós solda não interferiram nos resultados do respingo.

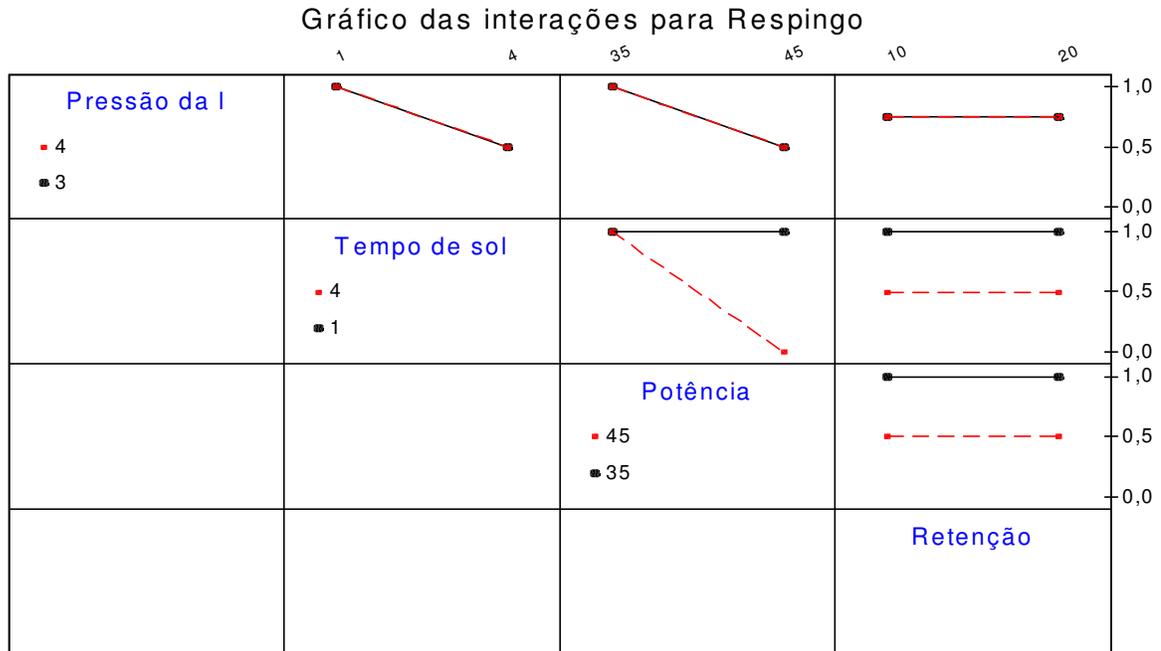


Figura 5.4: Efeitos de interação para a ausência de respingo

Dessa forma, a equação para a ausência de respingo fica sendo:

$$\text{Ausência de respingo} = 0,75 - 0,25 \cdot TS - 0,25 \cdot PO - 0,25 \cdot TS \cdot PO$$

5.1.3 – Resultados para a ausência de deformação na rosca

Continuando com a mesma análise para o calibre Passa Não Passa, tem-se o quadro 5.3 e as figuras 5.5 e 5.6.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0,5000	0,000000	*	*
Pressão	0,2500	0,1250	0,000000	*	*
Tempo de	-0,2500	-0,1250	0,000000	*	*
Potência	-0,7500	-0,3750	0,000000	*	*
Retenção	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de	-0,0000	-0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Potência	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Retenção	0,2500	0,1250	0,000000	*	*
Tempo de*Potência	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Tempo de*Retenção	-0,2500	-0,1250	0,000000	*	*
Potência*Retenção	0,2500	0,1250	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de*Potência	-0,2500	-0,1250	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de*Retenção	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Potência*Retenção	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Tempo de*Potência*Retenção	0,0000	0,0000	0,000000	*	*
Pressão*Tempo de*Potência*Retenção	-0,2500	-0,1250	0,000000	*	*

Quadro 5.3: Índices para o calibre Passa Não Passa

Gráfico dos efeitos principais para Pnp

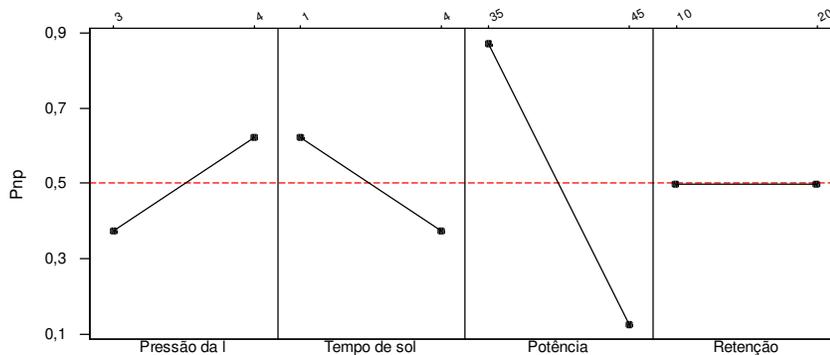


Figura 5.5: Efeito principal para o calibre Passa Não Passa

Para a análise da deformação da rosca é possível observar que o fator que mais influencia no resultado é a potência.

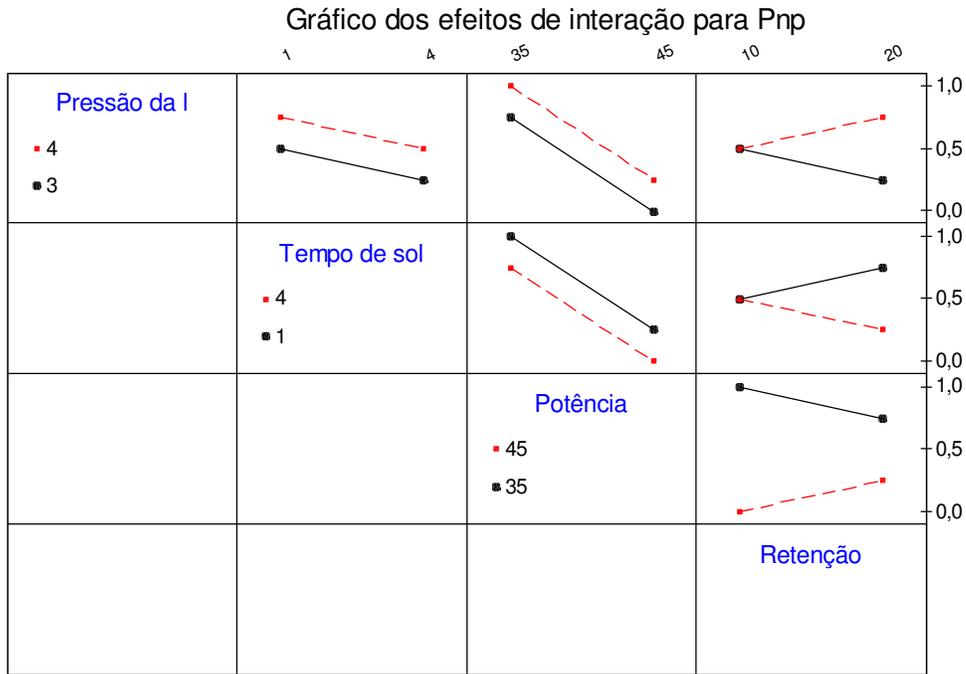


Figura 5.6: Efeitos de interação para o calibre Passa Não Passa

Dessa forma, a equação para o calibre Passa Não Passa fica sendo:

$$\text{Calibre Pnp} = 0,5 + 0,125*PL - 0,125*TS - 0,375*PO + 0,125*PL*RE - 0,125*TS*RE + 0,125*PO*RE - 0,125*PL*TS*PO - 0,125*PL*TS*PO*RE$$

5.1.4 – Resultados para a corrente de solda

E, finalmente, para corrente de solda tem-se o quadro 5.4 e os gráficos 5.7 e 5.8.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		23,6969	0,04729	501,10	0,000
Pressão	0,7562	0,3781	0,04729	8,00	0,000
Tempo de	0,4063	0,2031	0,04729	4,30	0,001
Potência	3,7062	1,8531	0,04729	39,19	0,000
Retenção	0,6188	0,3094	0,04729	6,54	0,000
Pressão*Tempo de	-0,4063	-0,2031	0,04729	-4,30	0,001
Pressão*Potência	0,4688	0,2344	0,04729	4,96	0,000
Pressão*Retenção	-0,1438	-0,0719	0,04729	-1,52	0,148
Tempo de*Potência	-0,1813	-0,0906	0,04729	-1,92	0,073
Tempo de*Retenção	0,5313	0,2656	0,04729	5,62	0,000
Potência*Retenção	-0,3187	-0,1594	0,04729	-3,37	0,004
Pressão*Tempo de*Potência	-0,1438	-0,0719	0,04729	-1,52	0,148
Pressão*Tempo de*Retenção	-0,0563	-0,0281	0,04729	-0,59	0,560
Pressão*Potência*Retenção	-0,3813	-0,1906	0,04729	-4,03	0,001
Tempo de*Potência*Retenção	0,1938	0,0969	0,04729	2,05	0,057
Pressão*Tempo de*Potência*Retenção	-0,1438	-0,0719	0,04729	-1,52	0,148

Quadro 5.4: Índices para a corrente de solda

Gráfico dos efeitos principais para Corrente de solda

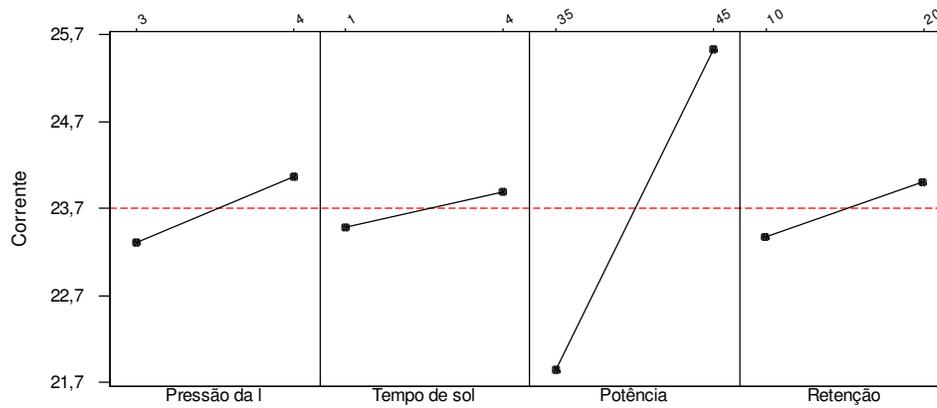


Figura 5.7: Efeito principal para a corrente

Mais uma vez a potência de solda é o principal fator, porém, é possível observar que os demais fatores também influenciam o resultado da corrente, até mesmo a pressão - que foi observada como de influência negativa para o torque - aqui aparece de forma positiva.

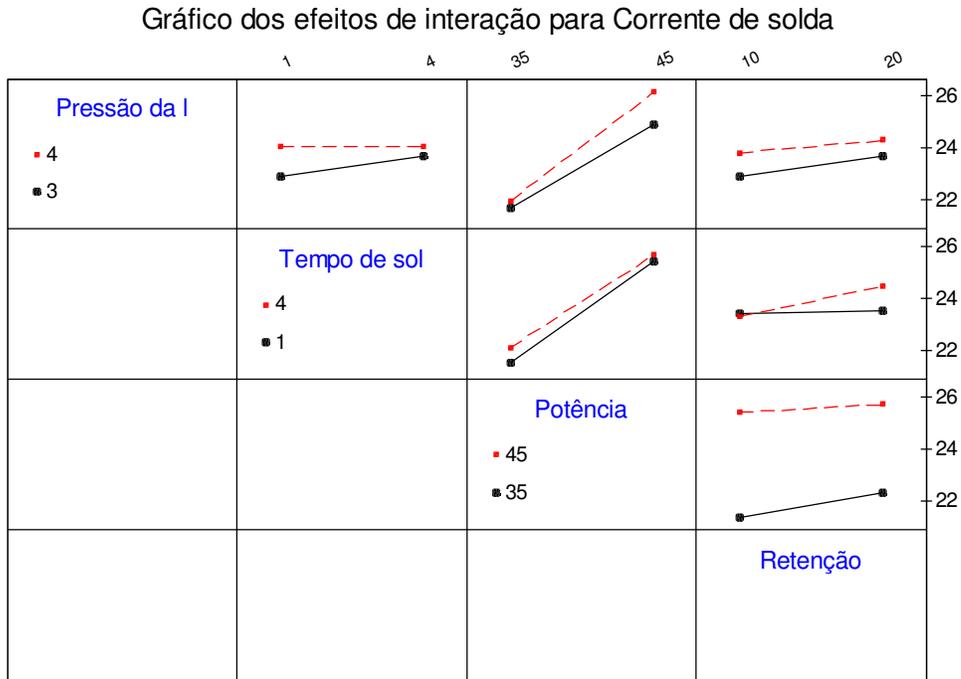


Figura 5.8: Efeitos de interação para a corrente

Dessa forma, a equação para a corrente fica sendo:

$$\begin{aligned} \text{Corrente} = & 23,6969 + 0,3781*PL + 0,2031*TS + 1,8531*PO + 0,3094*RE - \\ & 0,2031*PL*TS + 0,2344*PL*PO + 0,2656*TS*RE - 0,1594*PO*RE - \\ & 0,1906*PL*PO*RE \end{aligned}$$

5.1.5 – Resposta otimizada

De posse das equações para cada uma das respostas objetivadas, pode-se agora utilizar a função ‘Response Optimizer’ do programa MINITAB e dessa forma encontrar os melhores valores de ajuste para as variáveis de entrada.

A figura 5.9 apresenta o resultado da função ‘Response Optimizer’.

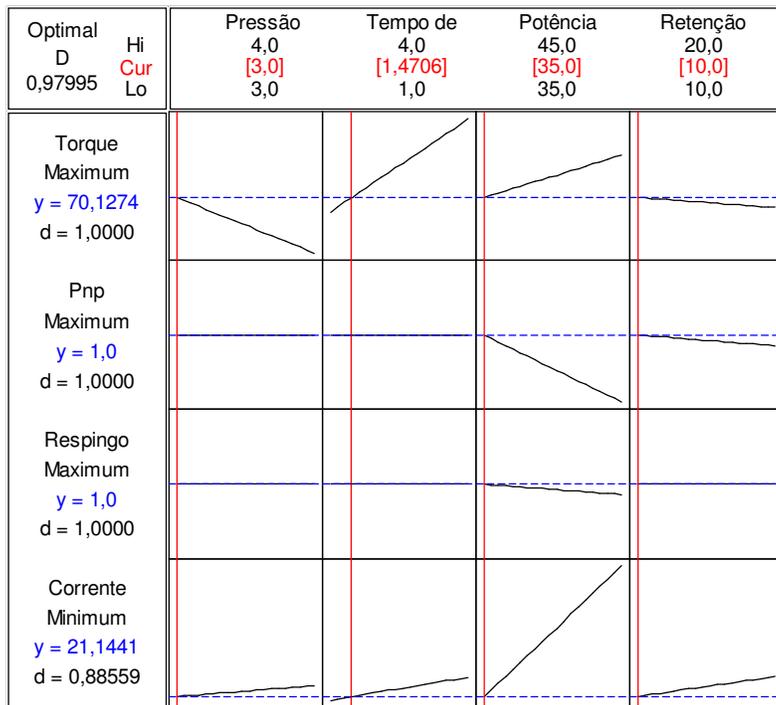


Figura 5.9: Resultado da função Response Optimizer

Dessa forma, pode-se concluir que o melhor ajuste para a pressão da linha deva ser 3,0 Bar; o tempo de solda deve ser de 1,5 ciclos; a potência da máquina deve ser de 35% e a retenção deve ficar em 10 ciclos.

Porém, temos aqui dois grupos de respostas:

Variáveis contínuas => Torque e a corrente

Variáveis discretas => Respingo e calibre Passa Não Passa

5.1.6 – Metodologia de superfície de resposta

Para as respostas do tipo variáveis contínuas, pode-se ainda utilizar a metodologia de superfície de resposta, e dessa forma chegar a um valor mais confiável, tanto para os coeficientes da equação como também para os valores de ajuste através do ‘Response Optimizer’. Dessa forma, seguem os novos valores das variáveis, que devem ser ajustadas não mais para apenas dois valores (-1 ; +1) e sim para 5 valores (-2; -1; 0; +1; +2), conforme apresentado no quadro 5.5. Também serão apresentados os cálculos para o torque e a corrente de solda.

Fator	Nível -2	Nível -1	Nível 0	Nível +1	Nível +2
Pressão da linha	2 Kgf/cm ²	3 Kgf/cm ²	4 Kgf/cm ²	5 Kgf/cm ²	6 Kgf/cm ²
Potência de solda	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %
Tempo de solda	1 ciclo	2 ciclos	3 ciclos	4 ciclo	5 ciclos
Tempo pós solda	5 ciclos	10 ciclos	15 ciclos	20 ciclos	25 ciclos

Quadro 5.5: Índices dos fatores para o RSM

RESULTADOS PARA RESISTÊNCIA AO TORQUE (RSM)

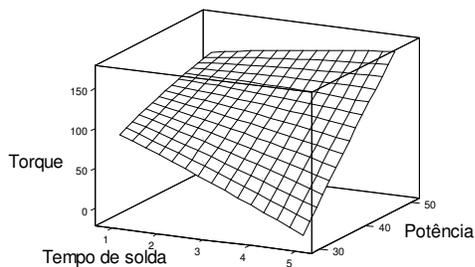
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	79,29	5,590	14,183	0,000
Pressão	-17,67	3,019	-5,852	0,000
Tempo de	2,83	3,019	0,938	0,362
Potência	36,92	3,019	12,228	0,000
Retenção	-0,75	3,019	-0,248	0,807
Pressão *Pressão	1,49	2,766	0,539	0,597
Tempo de*Tempo de	-0,51	2,766	-0,184	0,856
Potência*Potência	-0,76	2,766	-0,274	0,787
Retenção*Retenção	0,12	2,766	0,042	0,967
Pressão *Tempo de	2,00	3,698	0,541	0,596
Pressão *Potência	1,87	3,698	0,507	0,619
Pressão *Retenção	0,25	3,698	0,068	0,947
Tempo de*Potência	7,88	3,698	2,130	0,049
Tempo de*Retenção	5,75	3,698	1,555	0,139
Potência*Retenção	5,13	3,698	1,386	0,185

Quadro 5.6: Índices para o torque (RSM)

Com base nos novos resultados para o torque, a equação fica sendo:

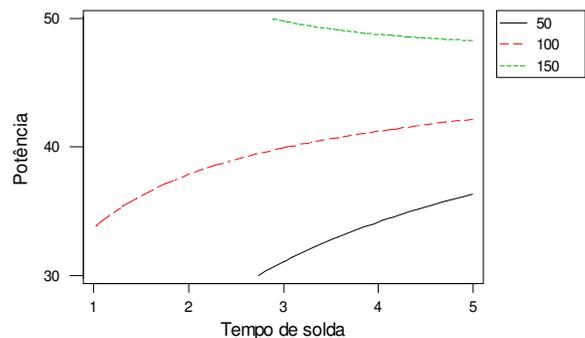
$$\text{Torque} = 79,29 - 17,67*PL + 36,92*PO + 7,88*TS*PO$$

Gráfico de superfície para o Torque



Valores mantidos: Pressão: 3,0 Retenção: 7,0

Gráfico de contorno para Torque



Valores mantidos: Pressão: 3,0 Retenção: 7,0

Figura 5.10: Gráficos para o torque (RSM)

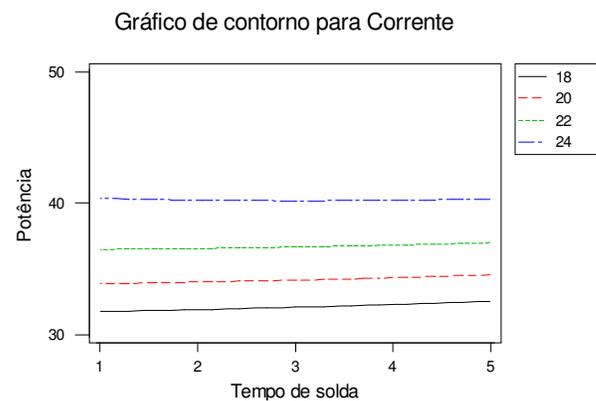
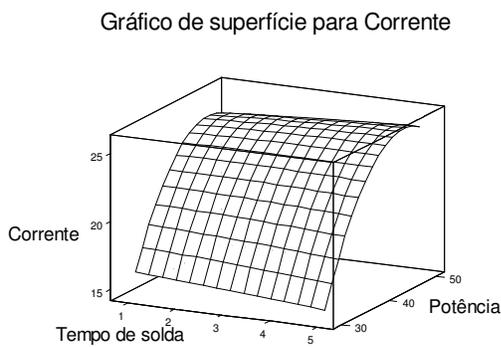
RESULTADOS PARA CORRENTE DE SOLDA (RSM)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	24,0000	0,15248	157,393	0,000
Pressão	0,3167	0,08235	3,845	0,001
Tempo de	0,1083	0,08235	1,316	0,207
Potência	2,1417	0,08235	26,007	0,000
Retenção	0,1083	0,08235	1,316	0,207
Pressão *Pressão	0,3833	0,07544	5,081	0,000
Tempo de*Tempo de	-0,0167	0,07544	-0,221	0,828
Potência*Potência	-0,9417	0,07544	-12,482	0,000
Retenção*Retenção	-0,0167	0,07544	-0,221	0,828
Pressão *Tempo de	-0,0875	0,10086	-0,868	0,398
Pressão *Potência	0,2125	0,10086	2,107	0,051
Pressão *Retenção	0,0375	0,10086	0,372	0,715
Tempo de*Potência	0,1250	0,10086	1,239	0,233
Tempo de*Retenção	0,1250	0,10086	1,239	0,233
Potência*Retenção	-0,2000	0,10086	-1,983	0,065

Quadro 5.7: Índices para a corrente de solda (RSM)

Dessa forma, a nova equação para a corrente de solda fica sendo:

$$\text{Corrente} = 24 + 0,3167*PL + 2,1417*PO + 0,3833*PL^2 - 0,9417*PO^2$$



Valores mantidos: Pressão: 3,0 Retenção: 7,0

Valores mantidos: Pressão: 3,0 Retenção: 7,0

Figura 5.11: Gráficos para a corrente de solda (RSM)

RESPOSTA OTIMIZADA (RSM)

Para encontrar-se os novos valores de ajuste para os melhores resultados de torque e corrente, pode-se aplicar novamente o ‘Response Optimizer’, obtendo a figura 5.12.

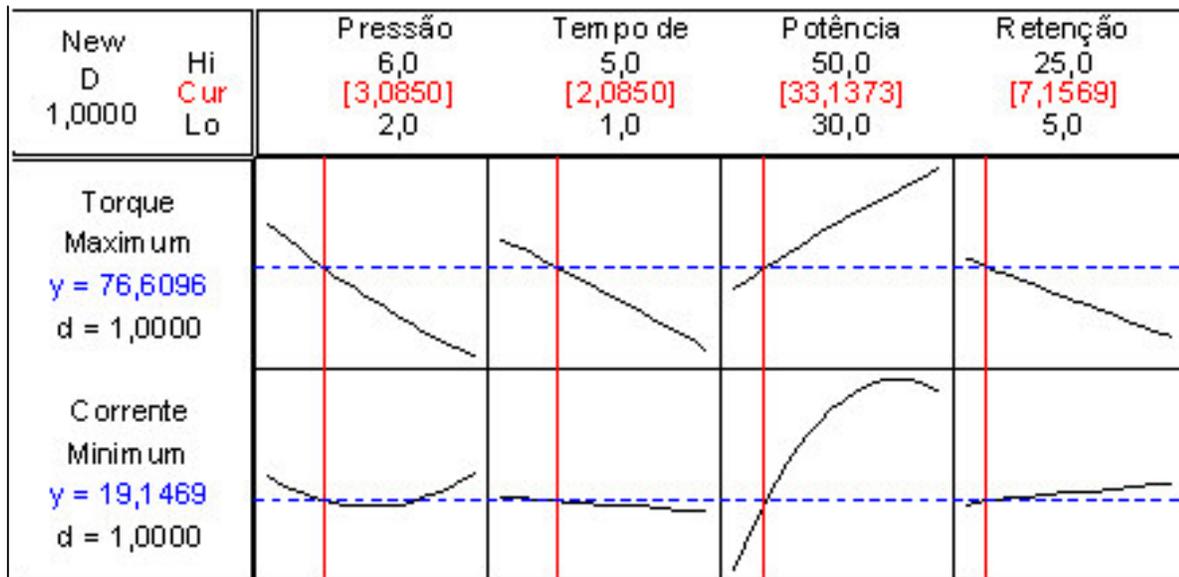


Figura 5.12: Resultado da função Response Optimizer (RSM)

Dessa forma, os novos valores de ajuste para a pressão da linha, o tempo de solda, a potência de solda e a retenção para os melhores resultados das saídas torque e corrente de solda são:

Pressão da linha = 3 Kgf/cm²

Tempo de solda = 2 ciclos

Potência de solda = 33 %

Retenção = 7 ciclos

Como esta resposta otimizada considera apenas o torque e a corrente de solda, deve-se verificar qual é o seu impacto para as demais saídas desejadas (respingo e deformação na rosca).

Analisando a figura 5.9, conclui-se que estes parâmetros também atenderão as necessidades de ausência de respingo e deformação da rosca.

5.2 – Simulação

Apesar do trabalho já se encontrar em um estágio bem avançado, ou até mesmo concluído, pode-se realizar mais uma análise dos dados apresentados pelo programa MINITAB e incrementar a resposta, que deixará de ser um valor específico para cada variável de entrada e será expressa através de uma distribuição.

Isso é possível através das técnicas de simulação, onde os dados (equações, níveis e variáveis) são ensaiados numa determinada quantidade de vezes, gerando o comportamento natural do processo em questão. Estes estudos serão realizados com o auxílio dos *softwares Crystal Ball e Excel*.

A seguir são apresentadas as simulações realizadas para o torque e a corrente de solda. Para tanto, é necessário conhecer a equação do torque e os desvios padrão para cada coeficiente da equação.

A equação do torque encontrada pelo método de superfície de resposta é:

$$\text{TORQUE} = 79,29 - 17,67*PL + 36,92*PO + 7,88*TS*PO$$

Os desvios padrões para cada coeficiente da equação são:

- 17,67 -> 3,019

36,92 -> 3,019

7,88 -> 3,698

De posse da equação do torque e dos desvios para cada coeficiente, introduziu-se os dados no programa *Crystal Ball*, realizando a sua simulação e ainda pedindo que fosse encontrada a distribuição que melhor representasse o comportamento dessa variável com esses fatores.

A figura 5.13 representa o ajuste realizado pelo programa *Crystal Ball*, que encontrou na curva normal o melhor ajuste para a distribuição gerada pelas equações calculadas.

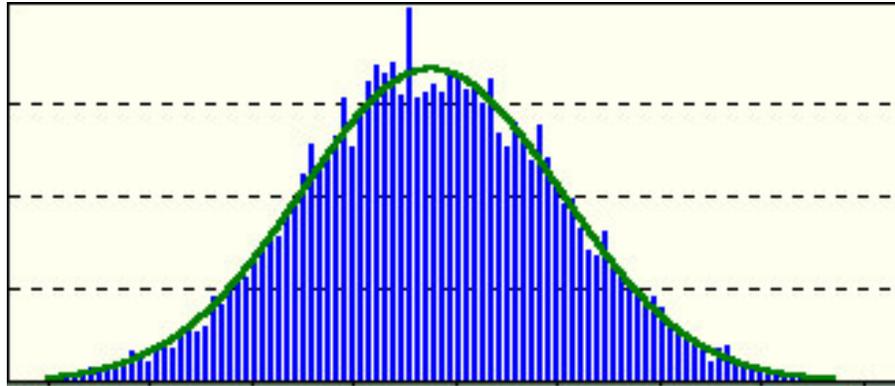


Figura 5.13: Resultado da simulação do torque

Esta mesma técnica será aplicada para todas as variações dos fatores (+1 ; -1), tanto para o torque como para a corrente de solda. O resultado de todas as simulações para todos os fatores (+1 ; -1), tanto para o torque como para a corrente de solda, estão demonstrados nos quadros 5.8 e 5.9.

PL	PO	TS	média	desvio padrão
+1	+1	+1	106,52	5,61
+1	+1	-1	90,67	5,70
+1	-1	-1	32,53	5,68
-1	-1	-1	67,95	5,70
-1	+1	-1	126,10	5,59
-1	-1	+1	52,17	5,66
+1	-1	+1	16,91	5,68
-1	+1	+1	141,78	5,70

Quadro 5.8: Distribuições para o torque

PL	PO	média	desvio padrão
+1	+1	25,9	0,16
+1	-1	21,62	0,16
-1	+1	25,26	0,16
-1	-1	20,98	0,16

Quadro 5.9: Distribuições para a corrente de solda

5.3 – Considerações gerais

O objetivo desse trabalho foi demonstrar, através de uma aplicação prática, a utilização das ferramentas estatísticas de análise e planejamento de experimentos no ambiente industrial, suas vantagens, focando a qualidade do produto, a robustez do processo de fabricação e a economia de recursos.

As ferramentas específicas utilizadas foram o delineamento de experimentos completo 2^k , a metodologia de superfície de resposta e, por fim, foi realizada a simulação dos resultados obtidos. A grande vantagem de realizar a simulação dos resultados obtidos é que isso tornou possível representar os valores encontrados na forma de distribuições estatísticas e não apenas em valores de ajustes otimizados para cada variável. Outro ponto importante com relação à simulação, é que através dessa ferramenta é possível observar o comportamento do processo sem que seja necessário o investimento em ensaios ou produção de peças.

Também destaca-se o pioneirismo da empresa quanto à utilização dessa ferramenta da qualidade, que participou de forma ativa disponibilizando um grupo de trabalho para acompanhar e executar os experimentos industriais, vencendo alguns paradigmas quanto aos “segredos” de se ajustar o processo em estudo e entendendo o valor da contribuição das ferramentas estatísticas nos seus processos de fabricação. Esse resultado foi tão positivo que os funcionários envolvidos elaboraram um plano para que outros produtos que passam pelo mesmo processo sejam estudados dessa mesma forma.

Uma das grandes vantagens desse estudo está relacionada ao fato de que várias características puderam ser analisadas de uma única vez, evitando que vários estudos fossem realizados para se atingir esse objetivo, sem contar que também foi possível observar as inter-relações entre as variáveis, o que não seria observado em um estudo único.

Outro resultado que surpreendeu a equipe foi que para esta aplicação da solda por projeção, a pressão dos eletrodos deve ser baixa. Ou seja, apesar da pressão ser uma característica da solda por projeção, o seu valor excessivo prejudica o resultado final da própria solda, pois o metal fundido, sendo pressionado pelos eletrodos, tende a escorrer da região onde a solda é realizada.

Também é esperado um aumento da vida útil dos eletrodos, visto que o valor da potência utilizada para esse processo foi reduzida de 45% para 33% da potência da máquina.

5.4 – Dificuldades

Durante todo o processo de desenvolvimento do trabalho (desde o seu planejamento, apresentação à empresa, reuniões de planejamento, etapas de execução do experimento e apresentação dos resultados) muitas dificuldades foram observadas e vencidas, tais como:

- Apesar das técnicas de planejamento e análise de experimentos ser do conhecimento de grande parte dos engenheiros de processo da empresa, a falta de domínio da ferramenta acabou gerando uma certa resistência à sua aplicação;
- Falta de conhecimento mais científico do processo, pois os parâmetros utilizados eram definidos com base na experiência dos envolvidos e nas informações do fabricante da máquina de solda;

- Falha nas definições dos valores de mínimo e máximo no início dos experimentos, o que inviabilizou os primeiros experimentos e até mesmo gerou situações de risco de acidente durante a sua realização;
- Dificuldades para agendar os experimentos, visto que o estudo foi realizado em um caso real, com produção normal. Dessa forma, os experimentos dependiam da disponibilidade de peças, mão-de-obra e prazo de entrega das produções normais.

Apesar das dificuldades apresentadas, o experimento realizado foi considerado um sucesso pelo grupo e serviu como motivação para que a ferramenta DOE seja cada vez mais explorada pela empresa em seus processos de fabricação.

5.5 – Trabalhos futuros

As técnicas de análise e planejamento de experimentos vêm ao longo do tempo provando ser uma ferramenta da qualidade indispensável para as indústrias de classe mundial. Nessa mesma linha, mais trabalhos práticos poderiam ser realizados objetivando “popularizar” essa ferramenta tão útil nos dias de hoje.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram identificadas todas as variáveis do processo, porém, foram definidas as quatro variáveis do estudo como sendo as de maior importância e as demais como sendo constantes e/ou ruídos. Com o intuito de confirmar essa afirmação e/ou definir parâmetros mais precisos para o processo em questão, poderiam ser realizados estudos considerando outras variáveis do processo.

Atualmente, as peças produzidas pelo processo de solda por resistência podem ser processadas em três máquinas diferentes, com parâmetros e concepção diferentes. Dessa forma, seria interessante realizar os estudos nas demais máquinas.

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.

ANNUAL QUALITY CONGRESS (2000). Foresight XXI. <http://www.asq.org>.

ANTONY, J.; KAYE, M.; FRANGOU, A.: *A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques. The TQM Magazine*, pp. 169-176, Volume 10 – Number 3, 1998.

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). *Statistic for food science V: comparison of many groups (part A). Nutrition & food science*, n.2, p. 78-84.

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.

CHANG, B.H.; ZHOU, Y. (2003). Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding. *Journal of Materials Processing Technology* n. 139, p.635–641

CHEW, V (1957). *Experimental designs in industry*. New York, John Wiley & Sons, Inc. p.1-58.

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.

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.

FLESCH, G. Aplicação de projeto de experimentos como suporte no projeto e melhoria de produtos no setor de autopeças. 2002 Dissertação (mestrado) - UFRS

GALDÁMEZ, Edwin V. C. Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos. 2002.Dissertação (Mestrado) – USP/EESC

GUEDES, T.A. (1996). Procedimentos de otimização no planejamento e controle da qualidade de produtos e processos. Florianópolis. 215p. Tese (doutorado) – UFSC.

HILL, W.J.; HUNTER, W.G. (1966). A review of response surface methodology: a literature survey. *Technometrics*, v.8, n.4, p.571-590.

INGLE, S. & ROE, W.: *Six sigma black belt implementation. The TQM Magazine*, pp. 273-280, Volume 13, Number 4, 2001.

JOU, M. (2003). Real time monitoring weld quality of resistance spot welding for the fabrication of sheet metal assemblies. *Journal of Materials Processing Technology* n.132 p. 102–113

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.

KONDA, R.; RAJURKAR, K.P.; BISHU, R.R; GUHA, A.; PARSON, M.: *Design of experiments to study and optimize process performance. International Journal of Quality & Reliability Management*, pp. 56-71, Volume 16, No. 1, 1999.

LEE, H.; CHOI, J. (2004). Overload analysis and fatigue life prediction of spot-welded specimens using an effective J-integral. *Mechanics of materials*. Elsier Ltd. www.sciencedirect.com

LEVINE, D.M.; BERENSON, M.L.; STEPHAN, D. (1998). Estatística: teoria e aplicações. Traduzido por Teresa Cristina Padilha de Souza e Sérgio da Costa Cortes. Rio de Janeiro, ed. Livros Técnicos e Científicos (LTC). Cap. 7-12, p. 329-620.

MONT'ALVÃO, C.A.: Determinação dos fatores significativos do processo de corte por plasma a ar comprimido através da utilização do projeto e análise de experimentos. Dissertação de Mestrado. EFEI, 1998.

MONTGOMERY, D.C. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Iberoamérica.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. Rio de Janeiro: LTC, 2a Ed., 1999.

MURUGAN, N. and PARMAR, R.S.; Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel; *Journal of Materials Processing Technology*, 41 pp. 381-398 381, July 7, 1993.

MYERS, R.H.; KHURI, A.I.; CARTER JR.; W.H. (1989). Response surface methodology: 1966-1988. *Technometrics*, v.31, n.2, p.137-157.

MYERS, R.H. & MONTGOMERY, D.C. (1995). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. Canada, John Wiley & sons, Inc.

NAKANO, D.N. & FLEURY, A.C.C.: Métodos de pesquisa na engenharia de produção. Universidade de São Paulo, 1996.

NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S; BRUNS, R.E.: Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.

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.

ROWLANDS, H.; ANTONY, J. (2003). Application of design of experiments to a spot welding process. Assembly automation. v. 23, n. 3, p.273–279

SILVA, E. L. (2001). Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. UFSC, Florianópolis.

SLACK, N. et al. (1997). Administração da produção. traduzido por Ailton B. Brandão, Carmem Dolores, Henrique Corrêa e Irineu Gianesi. São Paulo, Atlas. Cap. 5, p.112-143.

TAGUCHI, G. (1993): *Taguchi on robust technology development: bringing quality upstream by Genichi Taguchi*. New York, ASME.

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.

VIEIRA, S.R.B. (1996). Um sistema de gerenciamento da qualidade para fábricas montadoras com ênfase no método Taguchi. Florianópolis. 121p. Dissertação de mestrado - UFSC.

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.