

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Flávio Bonafé Oliveira**

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM  
UM PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO DE  
CROMO DURO EM VÁLVULAS DE ADMISSÃO E  
ESCAPE**

**Taubaté – SP**  
**2009**

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Flávio Bonafé Oliveira**

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM  
UM PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO DE  
CROMO DURO EM VÁLVULAS DE ADMISSÃO E  
ESCAPE**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de ***Mestre em Engenharia Mecânica***, do programa de Mestrado Profissional de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Produção Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Chaves

**Taubaté – SP**  
**2009**

**FLÁVIO BONAFÉ OLIVEIRA**

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM  
UM PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO DE  
CROMO DURO EM VÁLVULAS DE ADMISSÃO E  
ESCAPE**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**, do programa de Mestrado Profissional de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Produção Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Chaves

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

Doutor Carlos Alberto Chaves

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Álvaro Azevedo Cardoso, PhD

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Doutor Sebastião Cardoso

Vale Soluções em Energia

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que me deu coragem e forças para enfrentar mais este desafio.

A minha amada esposa Paula pelas palavras de apoio e carinho e pela demonstração diária de amor.

Aos meus pais Eunice e Edemir por terem sempre me guiado pelos caminhos do conhecimento.

Ao meu irmão Fernando e pelas trilhas que deixamos de fazer juntos.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela chuva de bênçãos que tem derramado sobre a minha vida, principalmente pelas oportunidades de aprendizado.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Chaves, por ter se tornado um grande amigo, pela ótima orientação, pela rapidez na revisão dos trabalhos e por sempre estar disponível para esclarecimentos.

Aos Doutores Álvaro Azevedo Cardoso e Sebastião Cardoso pela avaliação e contribuição ao trabalho.

Aos amigos da turma de mestrado Leonardo, Angelo, Ana Karina, Christina, Laércio, Reinaldo, Marcelo, José, Marcos, Marcelo e Alex pelas constantes contribuições.

A Universidade de Taubaté, que forneceu toda a infra-estrutura necessária para a aquisição do conhecimento e para realização do trabalho e à secretária Helena Barros pela ajudas constantes.

## RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo aplicar a metodologia Seis Sigma para a redução dos defeitos de mancha e queima na face das válvulas automotivas, defeitos estes que surgem durante o processo de eletrodeposição de cromo duro da haste das válvulas. A modalidade de pesquisa utilizada foi a pesquisa-ação, justificada pela participação efetiva do autor durante todo processo em estudo. Como resultado da aplicação da metodologia Seis Sigma constatou-se que os defeitos de mancha e queima na face das válvulas acontecem devido ao depósito de cromo na face da válvula durante a etapa de eletrodeposição de cromo duro. A quantidade de válvulas retrabalhadas do Cliente A foi reduzido de 203.970 para 8.483 peças por mês, o que permitiu uma redução de 96% do índice de retrabalho. A mesma análise feita sobre todas as válvulas produzidas pela empresa constata uma redução média do retrabalho de 413.016 peças para 24.027 peças por mês, o que significa uma redução de 96% para 6% do índice de retrabalho devido aos problemas de mancha e queima na face das válvulas.

**Palavras Chave:** Seis Sigma, Eletrodeposição de Cromo Duro e Qualidade.

## **ABSTRACT**

The present study has as objective to apply the Six Sigma methodology to reduce the defects of spot and burn in the surface of intake and exhaust valves. These defects comes from electrodeposition of hard chromium in the stem of the valves. The modality of used research was to the research-action, justified for the participation accomplishes of the author during all process of implantation. As a result it was identified that the defects of spot and burn in the surface of the valves occur due to the deposit of chromium in the face of valve during the hard chromium electroplating. The amount of reworked valves of the Client A was reduced from 203.970 to 8.483 pieces per month, witch means a reduction of 96% of the reworked pieces. When the same analysis is done on all valves produced by the company is possible to verify an average reduction of rework from 413.016 pieces to 24.027 pieces per month, witch means a rework reduction from 96% to 6% pieces per month.

**Keywords:** Six Sigma, Electrodeposition of Hard Chromium and Quality.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01:</b> Defeito de mancha na face.....	19
<b>Figura 02:</b> Defeito de queima na face.....	19
<b>Figura 03:</b> Operação de lixamento da face da válvula.....	20
<b>Figura 04:</b> Melhoria do processo aumentando a quantidade de sigmas no processo .....	26
<b>Figura 05:</b> Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de definição....	29
<b>Figura 06:</b> Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de medição.....	32
<b>Figura 07:</b> Influencia do sistema de medição na variação observada do processo .....	33
<b>Figura 08:</b> Tendência.....	34
<b>Figura 09:</b> Linearidade.....	34
<b>Figura 10:</b> Estabilidade.....	35
<b>Figura 11:</b> Repetitividade.....	35
<b>Figura 12:</b> Reprodutibilidade.....	36
<b>Figura 13:</b> Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de análise.....	38
<b>Figura 14:</b> Efeitos principais para um experimento de dois fatores.....	40
<b>Figura 15:</b> Exemplo de como construir um diagrama de dispersão.....	43
<b>Figura 16:</b> Guia de interpretação do diagrama de dispersão.....	45
<b>Figura 17:</b> Curva de regressão.....	45
<b>Figura 18:</b> Gráfico de explicação do coeficiente de determinação.....	47
<b>Figura 19:</b> Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de melhoria....	49
<b>Figura 20:</b> Modelo geral de um processo ou sistema.....	50
<b>Figura 21:</b> Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de controle....	59
<b>Figura 22:</b> Válvulas Automotivas.....	60
<b>Figura 23:</b> Válvula de Admissão e Escape no Motor.....	60
<b>Figura 24:</b> Regiões da Válvula.....	61
<b>Figura 25:</b> Válvula Monometálica.....	62
<b>Figura 26:</b> Válvula Monometálica com Blindagem na Sede.....	63
<b>Figura 27:</b> Válvula Bimetálica.....	64
<b>Figura 28:</b> Válvula Bimetálica com Blindagem na Sede.....	64
<b>Figura 29:</b> Carregamento e Descarregamento do Equipamento.....	75
<b>Figura 30:</b> Lavagem das válvulas cromadas.....	76

<b>Figura 31:</b> Esquema da estratégia de coleta de dados para a análise do sistema de medição.....	77
<b>Figura 32:</b> Desenho esquemático do teste realizado em laboratório para a coleta de dados para a análise de regressão da Resistência Elétrica da peça versus a temperatura da peça.....	79
<b>Figura 33:</b> Esquema do delineamento de experimentos utilizando a variável de entrada tipo de gancheira.....	79

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01:</b> Tabela de Conversão para a Escala Sigma.....	26
<b>Tabela 02:</b> Tabela da Análise de Variância.....	52
<b>Tabela 03:</b> Etapas, concentrações, temperaturas e tempos para aplicação do cromo duro sobre o aço.....	68
<b>Tabela 04:</b> Tabela dos Problemas, Possíveis Causas e Correções.....	69
<b>Tabela 05:</b> Tabela dos Problemas e Possíveis Causas.....	71
<b>Tabela 06:</b> Repetitividade do Sistema de Medição.....	87
<b>Tabela 07:</b> Reprodutibilidade do Sistema de Medição.....	87
<b>Tabela 08:</b> Identificação da fase do processo onde surgem as manchas e queimas na face da válvula.....	88
<b>Tabela 09:</b> Porcentagem de mancha e queima na face da válvula para vários valores de $A/dm^2$ .....	94
<b>Tabela 10:</b> Porcentagem de mancha e queima na face da válvula para vários valores de Velocidade.....	95
<b>Tabela 11:</b> Dados de temperatura e resistência da análise de regressão.....	98
<b>Tabela 12:</b> Dados coletados no delineamento de experimentos.....	99
<b>Tabela 13:</b> Tabela ANOVA para a porcentagem de Queima na Face.....	101
<b>Tabela 14:</b> Tabela ANOVA para a porcentagem de Mancha na Face.....	101

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 01:</b> Exemplo de um gráfico de efeitos principais.....	41
<b>Gráfico 02:</b> Exemplo de um diagrama de Pareto.....	53
<b>Gráfico 03:</b> Exemplo de um gráfico de probabilidade normal.....	54
<b>Gráfico 04:</b> Exemplo de um gráfico de Interação entre os Efeitos.....	55
<b>Gráfico 05:</b> Gráfico da quantidade de peças retrabalhadas no período entre janeiro e junho de 2008.....	81
<b>Gráfico 06:</b> Diagrama de Pareto dos Defeitos de Mancha e Queima na Face (Jan a Jun/07).....	84
<b>Gráfico 07:</b> Gráfico de efeitos principais para o defeito de queima na face.....	93
<b>Gráfico 08:</b> Gráfico de efeitos principais para o defeito de mancha na face.....	93
<b>Gráfico 09:</b> Gráfico de dispersão para a % de Queima versus o parâmetro amperagem por decímetro <sup>2</sup> .....	94
<b>Gráfico 10:</b> Gráfico de dispersão para a % de Mancha versus o parâmetro amperagem por decímetro <sup>2</sup> .....	95
<b>Gráfico 11:</b> Gráfico de dispersão para a % de Queima versus o parâmetro Velocidade.....	96
<b>Gráfico 12:</b> Gráfico de dispersão para a % de Mancha versus o parâmetro Velocidade.....	96
<b>Gráfico 13:</b> Gráfico de dispersão da resistência da peça versus a temperatura	98
<b>Gráfico 14:</b> Gráfico de Pareto dos efeitos para a porcentagem de queima na face das válvulas.....	102
<b>Gráfico 15:</b> Gráfico de Pareto dos efeitos para a porcentagem de mancha na face das válvulas.....	102
<b>Gráfico 16:</b> Gráfico de interação dos fatores para a porcentagem de queima na face das válvulas.....	103
<b>Gráfico 17:</b> Gráfico de interação dos fatores para a porcentagem de mancha na face das válvulas.....	103
<b>Gráfico 18:</b> Gráfico de cubo para a porcentagem de queima na face da válvula.....	104
<b>Gráfico 19:</b> Gráfico de cubo para a porcentagem de mancha na face da válvula.....	104
<b>Gráfico 20:</b> Boxplot da porcentagem de defeitos de queima na face antes e depois da instalação do ventilador na tubulação de exaustão do equipamento.....	106

<b>Gráfico 21:</b> Boxplot da porcentagem de defeitos de mancha na face antes e depois da instalação do ventilador na tubulação de exaustão do equipamento.....	106
<b>Gráfico 22:</b> Boxplot da porcentagem de peças defeituosas antes e depois da instalação do ventilador na tubulação central do sistema de exaustão.....	108
<b>Gráfico 23:</b> Gráfico de controle da quantidade de peças do Cliente A retrabalhadas antes, durante e após a conclusão do projeto Seis Sigma.....	109
<b>Gráfico 24:</b> Gráfico de controle da quantidade de peças retrabalhadas antes, durante e após a conclusão o estudo para todas as peças.....	111

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b>	<b>18</b>
1.1 Descrição do problema	18
1.2 Objetivo	20
<b>2. Qualidade</b>	<b>21</b>
<b>3. Metodologia Seis Sigma</b>	<b>25</b>
3.1 DMAIC	27
3.1.1 Fase de Definição	27
3.1.1.1 Mapa de Raciocínio	28
3.1.2 Fase de Medição	30
3.1.2.1 Diagrama de Pareto	30
3.1.2.2 Mapa de Processo	31
3.1.2.3 Análise do Sistema de Medição – MSA	33
3.1.3 Fase de Análise	36
3.1.3.1 Matriz de Causa e Efeito	37
3.1.3.2 Análise Estatística Multivariada	39
3.1.3.2.1 Gráfico de Efeitos Principais	40
3.1.3.3 Análise de Regressão Linear Simples	42
3.1.3.3.1 Coeficiente de Determinação ( $r^2$ )	46
3.1.4 Fase de Melhoria (Improve)	47
3.1.4.1 Delineamento de Experimentos	48
3.1.4.1.1 Análise dos Efeitos através do Diagrama Pareto	53
3.1.4.1.2 Análise dos Efeitos através do Gráfico de Probabilidade Normal	54
3.1.4.1.3 Análise dos Efeitos através do Gráfico de Interações	55
3.1.5 Fase de Controle	56
3.1.5.1 Gráficos de Controle	57
<b>4. Válvulas de Admissão e Escape</b>	<b>60</b>
4.1 Regiões da Válvula	61
4.2 Tipos de Construção de Válvulas	62

4.2.1 Válvulas Monometálicas.....	62
4.2.2 Válvulas Monometálicas com Blindagem na Sede.....	63
4.2.3 Válvula Bimetálicas.....	63
4.2.4 Válvula Bimetálica com Blindagem na Sede.....	63
<b>5. Processo de Eletrodeposição de Cromo Duro.....</b>	<b>65</b>
5.1 Tipos Falhas e Defeitos Gerados no Processo de Eletrodeposição de Cromo Duro.....	69
<b>6. Metodologia da Pesquisa.....</b>	<b>72</b>
6.1 Descrição da Empresa.....	74
6.2 Detalhamento do Processo Estudado.....	74
6.2.1 Carregamento e Descarregamento das Peças no Equipamento.....	75
6.2.2 Desengraxante, Lavagem com Água e Ativação do Cromo.....	75
6.2.3 Deposição de Cromo.....	75
6.2.4 Lavagem com Água.....	76
6.3 Roteiro para Obtenção dos Dados.....	76
<b>7. Resultados e Discussões.....</b>	<b>80</b>
7.1 Fase de Definição.....	80
7.1.1 Linha de base.....	80
7.1.2 Mapa de raciocínio.....	81
7.2 Fase de Medição.....	84
7.2.1 Diagrama de pareto.....	84
7.2.2 Mapeamento do processo.....	84
7.2.3 Análise do sistema de medição.....	85
7.2.4 Identificação da fase do processo onde surgem as manchas e queimas.....	85
7.3 Fase de Análise.....	88
7.3.1 Matriz de causa e efeito.....	88
7.3.2 Análise estatística multivariada.....	90
7.3.3 Análise de regressão linear simples com os parâmetros Amperagem por decímetro <sup>2</sup> e velocidade de cromação.....	91
7.3.4 Análise de regressão linear simples com as variáveis cromo na superfície da válvula e temperatura da válvula.....	97

7.4 Fase de Melhoria.....	99
7.4.1 Delineamento de experimento com a variável de entrada tipo de gancheira.....	99
7.4.2 Teste do Sistema de Exaustão.....	104
7.5 Fase de Controle.....	108
7.5.1 Plano de Controle.....	108
<b>8. Conclusão.....</b>	<b>112</b>
<b>Referências.....</b>	<b>113</b>

“Se eu fosse tão inteligente, a ponto de falar todas as línguas dos homens a até mesmo a língua dos anjos, mas não soubesse amar a Deus e amar ao próximo, eu seria como ruído de um gongo ou o som de um sino.”

“Se eu tivesse o dom de falar como um profeta, e conseguisse entender todos os mistérios e fosse um cientista capaz de conhecer toda a ciência, mas não amasse a Deus e não amasse o próximo, eu não valeria nada.”

**I Coríntios 13:1-2**

## **1. Introdução**

No mercado global de hoje, as empresas estão se vendo obrigadas a rever suas estratégias de gestão para sustentar suas vendas, lucros e garantir que os clientes estejam satisfeitos com seus produtos, visto a alta competitividade que o advento da globalização trouxe a todos os setores de negócio.

Para se tornarem mais competitivas frente à concorrência global, desde o início da década de 80, as empresas têm observado e vivido uma verdadeira avalanche de ferramentas e metodologias de gestão, desde as sete ferramentas da qualidade até mais recentemente o *Balanced Scorecard* e o Seis Sigma.

Muitas destas iniciativas alcançaram efeitos positivos, mas, analisando os resultados das empresas que adotaram o sistema Seis Sigma, ficou muito claro que essa metodologia leva a um aumento e a uma melhoria de resultados muito mais significativos (ROTONDARO, 2002).

Segundo Harry (1998), só em 1999 a General Eletric economizou mais de US\$1,5 bilhão por causa do programa Seis Sigma, a Motorola estima que, em pouco mais de 10 anos, conseguiu economizar mais de US\$ 11 bilhões e a gigante Allied Signal que iniciou em 1994 a implementação do Seis Sigma, de lá para cá, reduziu seus custos em US\$ 2 bilhões.

Seis Sigma é uma metodologia rigorosa que utiliza ferramentas e métodos estatísticos para definir os problemas e situações a melhorar, medir para obter a informação e os dados, analisar a informação coletada, incorporar e empreender melhorias nos processos e, finalmente, controlar os processos ou produtos existentes, com a finalidade de alcançar etapas ótimas, o que por sua vez gerará um ciclo de melhoria contínua (ROTONDARO, 2002).

Porém, apesar de todas as definições técnicas para o Seis Sigma, as organizações que implementam esta metodologia, fazem isso com a meta de melhorar seus lucros.

### **1.1 Descrição do problema**

A empresa em estudo é uma indústria do ramo automotivo fabricante de válvulas de admissão e escape para motores de combustão interna. Visto a característica de trabalho das válvulas dentro do motor, o processo de construção das mesmas é complexo, passando por operações de forjamento, tratamentos térmicos, solda por

fricção e plasma, inúmeras retíficas, e tratamentos de superfície, tais quais, nitretação e eletrodeposição de cromo duro na haste.

Ao longo do desenvolvimento e amadurecimento de seus processos, a eletrodeposição de cromo duro se tornou um sério problema para esta empresa devido aos defeitos de mancha e queima na face das válvulas, conforme as figuras 01 e 02.

A figura 01 apresenta o defeito de mancha na face e a figura 02 apresenta o defeito de queima na face, notados nas válvulas de um cliente responsável pelo volume de aproximadamente 200.000 válvulas por mês.



**Figura 01:** Defeito de mancha na face.



**Figura 02:** Defeito de queima na face.

Para as válvulas deste cliente era necessário realizar uma operação de lixamento na face das válvulas para a remoção das manchas e queimas. A operação de lixamento da face, apresentado na Figura 03, não constava no *layout* oficial do produto, fazendo com que o custo onerado por esta operação sobressalente reduzisse o lucro da empresa sobre cada peça produzida.



**Figura 03:** Operação de lixamento da face da válvula.

## 1.2 Objetivo

A presente dissertação tem como objetivo mostrar um estudo de caso da aplicação da metodologia Seis Sigma para a eliminação dos defeitos de mancha e queima na face das válvulas, gerado no processo de eletrodeposição de cromo duro na haste, eliminando assim o retrabalho de lixamento da face das válvulas.

## 2. Qualidade

Segundo Campos (1992), qualidade pode ser facilmente compreendida como atender perfeitamente, de forma confiável, acessível, segura e no tempo certo, às necessidades do cliente.

Deming (1990) também enfatiza o cliente ao relatar que Qualidade não é luxo, mas sim aquilo que o cliente necessita e realmente quer. Além do mais, é difícil defini-la precisamente já que os desejos dos clientes estão em constante mudança e assim sendo, a solução para definir qualidade é redefinir constantemente as especificações.

Para Garvin (2002), a qualidade não tem um significado preciso, tendo assim cinco abordagens principais:

- A transcendente: nesta visão a qualidade é exemplo de “excelência inata”;
- A baseada no produto: qualidade é uma variável precisa e mensurável, podendo ser avaliada objetivamente;
- A baseada no usuário: a qualidade é subjetiva, calcada na preferência do consumidor;
- A baseada na produção: a qualidade está em conformidade com as especificações;
- A baseada no valor: a qualidade é definida em termos de custos e preços, relacionando esses dois aspectos em seu resultado para o consumidor.

Oakland (1994) cita que qualidade é a consistente busca pelo atendimento dos requisitos do cliente e ainda menciona que as organizações “seduzem” o cliente ao atender suas exigências proporcionando uma reputação de excelência.

De acordo com Rodrigues (1995), as primeiras preocupações com a qualidade dos produtos e serviços datam do início da existência da humanidade. A busca, pelo homem primitivo, de material mais resistente para construir suas armas, a procura de métodos para obter melhores colheitas às margens do Nilo, ou os detalhes que marcaram as edificações da antiga Roma retratam momentos distintos de um passado distante, mas que em uma análise criteriosa e contextualizada são comuns em suas preocupações com a qualidade. Já em 350 a.C., Aristóteles dizia que “a perfeição não deve ser um ato, mas deve ser um hábito.”

Oliveira, Palmisano e Mañas (2004) dizem que, a evolução da qualidade passou por três grandes fases: a era da inspeção, a era do controle e a era da qualidade total.

Na era da inspeção o produto era verificado (inspecionado) pelo produtor e pelo cliente, o que ocorreu um pouco antes da revolução industrial, período em que atingiu o seu auge. Os principais responsáveis pela inspeção eram os próprios artesãos. Nessa época, o foco principal estava na detecção de eventuais defeitos de fabricação, sem haver metodologia estabelecida para executá-la (OLIVEIRA, PALMISANO e MAÑAS, 2004).

Na era seguinte (controle estatístico), o controle da inspeção foi aprimorado por meio da utilização de técnicas estatísticas. Em função do crescimento da demanda mundial por produtos manufaturados, inviabilizou-se a inspeção produto a produto, como era na era anterior, e a técnica da amostragem passou a ser utilizada. No início desta era, o enfoque também recaía sobre o produto, como no caso anterior. Porém, com o passar do tempo, foi se deslocando para o controle do processo de produção, possibilitando o surgimento das condições necessárias para o início da era da qualidade total (OLIVEIRA, PALMISANO e MAÑAS, 2004).

Na era da qualidade total, no qual se enquadra o período em que estamos vivendo, a ênfase passa a ser o cliente, tornando-se o centro das atenções das organizações que dirigem seus esforços para satisfazer às necessidades e expectativas. A principal característica desta era é que toda empresa passa a ser responsável pela qualidade dos produtos e serviços a todos os funcionários e todos os setores (OLIVEIRA, PALMISANO e MAÑAS, 2004).

Sendo assim, segundo Rampasso (2006), uma empresa que pretende ser competitiva, nos tempos atuais, precisa estimular o desenvolvimento de estruturas e processos cada vez mais eficazes e adotar modelo de gestão voltado para a racionalização, a qualidade de produtos e serviços, a redução de custos, etc. Ou seja, precisa estar comprometida com a melhoria contínua.

Para Zacharias (2001), a competitividade de uma organização é conseguida por ações constantes de melhorias na sua Qualidade e Produtividade. A cultura da melhoria contínua significa não somente melhores produtos ou serviços, mas também a necessidade de ser ágil nas respostas, o que representa vantagens adicionais frente ao mercado.

A melhoria contínua é o grande objetivo dos programas de qualidade e produtividade. Melhoria é a transição para um melhor estado ou condição, normalmente, gerando vantagens (WEBSTER, 2001).

Ishikawa (1993) enfatiza que programas da qualidade só podem ser bem sucedidos se todas as pessoas envolvidas assumirem suas responsabilidades, e a comissão de frente da empresa tiver conhecimento de todos os fatos na ponta da língua.

Para Oakland (1994), para um programa da qualidade ser bem sucedido ele deve de fato ser aplicado em todas as áreas e começar pelo topo, com o diretor executivo. A alta gerência deve demonstrar que encara a qualidade com seriedade; a média gerência, papel importantíssimo, deve dominar os princípios da Gerência da Qualidade e explicá-los aos chefiados estando segura que o comprometimento com a qualidade é passado aos subordinados. Quando difundido em toda a organização, esse nível de gerência deve assegurar que os esforços e realizações de seus subordinados obtenham o reconhecimento, a atenção e a recompensa que merecem.

Paladini (1997) expõe que em primeira análise ações sistêmicas a nível de setor e indivíduo garantirão o gerenciamento e implantação da qualidade por toda a empresa, e em segunda análise, a nível de alta administração com a aprovação das políticas e metas para a qualidade propostas pela gerência.

A implantação de programas da qualidade em determinada empresa, independente do ramo de atuação ou porte, acontece dando-se ênfase nas atividades usuais da empresa. Isso provocará mudanças, que podem implicar em novas posturas, novas atitudes, novos comportamentos, sendo portanto importante tratar a qualidade como um processo evolutivo da cultura, sem que haja mudanças das atividades usuais (PALADINI, 1994).

Oakland (1994) identificou cinco pontos que devem ser considerados numa implantação:

- Abordagem do Gerenciamento da Qualidade Total: todos os níveis devem compreender o objetivo do programa pois assegura que administração adote uma visão estratégica da qualidade concentrando-se na prevenção e não detecção de problemas;

- Comprometimento e política: alta gerência e média gerência devem mostrar-se indispensavelmente comprometidas com a qualidade, passando-a para chefias cientes da importância da aplicação da política na organização;

- Criação ou mudança de Cultura: fundamental para a empresa a cultura deve ser aplicada de tal modo que cada funcionário seja responsável pelo seu próprio desempenho e saiba a direção das metas e objetivos em comuns da organização; Liderança eficaz: inicia com o executivo principal através de uma estratégia para implantação com o apoio nos níveis inferiores;

- Fundamentos para a gerência: compromisso e melhoramento contínuo passando a filosofia de fazer certo na primeira vez, treinando o pessoal e eliminando barreiras departamentais.

Nota-se que entre diversos autores a percepção é de que os programas de melhoria da qualidade trazem vantagens às empresas. Para isso, é fundamental um comprometimento de toda a empresa, em todos os níveis hierárquicos, com todos trabalhando em sinergia, visando às mesmas metas e reconhecendo que a implantação do programa é um processo de aperfeiçoamento contínuo.

### 3. Metodologia Seis Sigma

No jargão estatístico, sigma é a medida da variação do processo ou o desvio padrão (KLEFSJO, WIKLUND e EDGEMAN, 2001). Contudo quando se trata de Seis Sigma existem várias definições e interpretações, como por exemplo, uma métrica de comparação, uma visão, uma filosofia, uma abordagem metodológica, um símbolo, um valor específico, ou uma meta. Todas elas apresentam a definição holística do que o Seis Sigma pode fazer, mas nenhuma retrata com precisão o que realmente o Seis Sigma significa (STAMATIS, 2004).

Segundo Allen (2006), Seis Sigma é um método organizado e sistêmico, voltado a solução de problemas, onde os objetivos são a melhoria estratégica dos sistemas existentes e o aumento da confiabilidade no desenvolvimento de novos produtos e serviços através da utilização de métodos estatísticos e métodos científicos que permitem uma redução drástica na taxa de defeitos definida pelo cliente e/ou melhoria nas principais variáveis de saída.

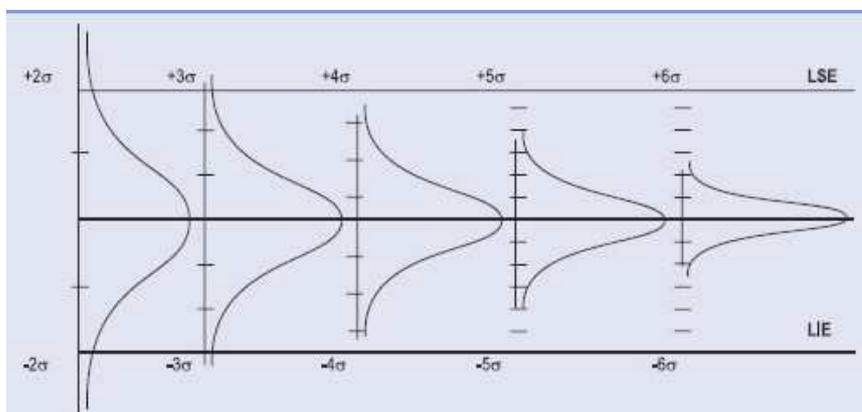
Na ótica do Seis Sigma todos os processos apresentam algum grau de variabilidade. O problema ocorre quando essa variabilidade é superior àquela esperada pelo cliente e quando isso acontece, é sinal de que o processo gerou um defeito. A proposta do Seis Sigma é a redução dos defeitos gerados pelo processo.

O termo sigma mede a capacidade do processo em trabalhar livre de falhas, ou seja, é a forma de se medir o número de defeitos do processo estudado. Quando falamos em qualidade Seis Sigma, significa que estamos trabalhando com uma performance de 3,4 defeitos por milhão ou 99,99966% de desempenho. A figura 04 mostra, de forma esquemática, o entendimento de melhoria do processo, utilizando o conceito de diminuição da variabilidade para aumentar, assim, o número de Sigmas dentro da especificação.

A escala sigma do processo pode ser calculada pela conversão do índice de defeitos por milhão de oportunidades (DPMO). A equação 01 apresenta o modelo utilizado para o cálculo do DPMO:

$$\text{DPMO} = \frac{\text{Número de Defeitos Encontrados}}{\text{N}^\circ \text{ Total de Unidades} \times \text{N}^\circ \text{ de Oportunidades de Defeito}} \times 10^6 \quad \text{Equação 01}$$

O valor de DPMO obtido através da equação 01 deve ser substituído na tabela de conversão para a Escala Sigma (tabela 01) para que seja possível identificar o nível sigma do processo.



**Figura 04:** Melhoria do processo aumentando a quantidade de sigmas no processo.  
**Fonte:** Adaptado de WERKEMA, 2002.

**Tabela 01:** Tabela de Conversão para a Escala Sigma

Escala Sigma	DPMO	Escala Sigma	DPMO	Escala Sigma	DPMO	Escala Sigma	DPMO	Escala Sigma	DPMO
0,00	933.193	1,20	617.912	2,40	184.060	3,60	17.865	4,80	483
0,05	926.471	1,25	598.706	2,45	171.056	3,65	15.778	4,85	404
0,10	919.243	1,30	579.260	2,50	158.655	3,70	13.904	4,90	337
0,15	911.492	1,35	559.618	2,55	146.859	3,75	12.225	4,95	280
0,20	903.199	1,40	539.828	2,60	135.666	3,80	10.724	5,00	233
0,25	894.350	1,45	519.939	2,65	125.072	3,85	9.387	5,05	193
0,30	884.930	1,50	500.000	2,70	115.070	3,90	8.198	5,10	159
0,35	874.928	1,55	480.061	2,75	105.650	3,95	7.143	5,15	131
0,40	864.334	1,60	460.172	2,80	96.800	4,00	6.210	5,20	108
0,45	853.141	1,65	440.382	2,85	88.508	4,05	5.386	5,25	89
0,50	841.345	1,70	420.740	2,90	80.757	4,10	4.661	5,30	72
0,55	828.944	1,75	401.294	2,95	73.529	4,15	4.024	5,35	59
0,60	815.940	1,80	382.088	3,00	66.807	4,20	3.467	5,40	48
0,65	802.338	1,85	363.169	3,05	60.571	4,25	2.980	5,45	39
0,70	788.145	1,90	344.578	3,10	54.799	4,30	2.555	5,50	32
0,75	773.373	1,95	326.355	3,15	49.471	4,35	2.186	5,55	26
0,80	758.036	2,00	308.537	3,20	44.565	4,40	1.866	5,60	21
0,85	742.154	2,05	291.160	3,25	40.059	4,45	1.589	5,65	17
0,90	725.747	2,10	274.253	3,30	35.930	4,50	1.350	5,70	13
0,95	708.840	2,15	257.846	3,35	32.157	4,55	1.144	5,75	11
1,00	691.463	2,20	241.964	3,40	28.717	4,60	968	5,80	9
1,05	673.645	2,25	226.627	3,45	25.588	4,65	816	5,85	7
1,10	655.422	2,30	211.856	3,50	22.750	4,70	687	5,90	5
1,15	636.831	2,35	197.663	3,55	20.182	4,75	577	5,95	4
								6,00	3

**Fonte:** Adaptado de HARRY e SCHROEDER (2000)

Cada metodologia apresenta uma abordagem conceitual de trabalho. Com o Seis Sigma não é diferente, na verdade, o Seis Sigma apresenta duas abordagens de trabalho. A primeira é voltada para problemas existentes (DMAIC), e a segunda, para prevenir que problemas aconteçam em novos produtos ou serviços (DCOV).

Este trabalho estará restrito ao desdobramento do DMAIC, pois o estudo de caso apresentado se trata da melhoria de um processo já existente.

### 3.1 DMAIC

Para Perez-Wilson (1998), a metodologia Seis Sigma é muito mais que um método, é uma maneira ordenada, lógica e sistemática de realizar alguma coisa. É um conjunto de ferramentas organizadas de forma clara, lógica e sistemática para alcançar um objetivo.

O DMAIC é a abordagem utilizada quando a metodologia Seis Sigma é aplicada na melhoria de processos ou sistemas já existentes. Esta abordagem contempla as fases de **D**efinir, **M**edir, **A**nalisar, **M**elhorar (Improve) e **C**ontrolar (AMADO, 2006).

Segundo Lynch, Bertolino e Cloutier (2003), o DMAIC é análogo a um funil. Uma ampla oportunidade de uma empresa ter seu escopo progressivamente estreitado, inicialmente utilizando as definições de projeto Seis Sigma e posteriormente as ferramentas Seis Sigma. O resultado é um problema que pode facilmente ser entendido e rapidamente endereçado com um foco de mira “laser”.

#### 3.1.1 Fase de Definição

**Definir** é a primeira fase de um projeto Seis Sigma. É nesta fase que o time de trabalho é definido, um charter é criado, as necessidades e expectativas do cliente são determinadas e, finalmente, um mapa atual do processo a ser melhorado é criado (ECKES, 2003).

Para Stamatis (2004), a fase de definição é composta por cinco estágios: definir o problema, identificar os clientes, identificar as características críticas para a qualidade, mapear o processo atual e definir o escopo do projeto.

A figura 05 mostra esquematicamente as ferramentas que podem ser utilizadas, algumas questões de revisão e as saídas que devem ser apresentadas ao final da fase de definição de um projeto Seis Sigma, dentre as quais destacam-se o mapeamento do fluxo de valor, matriz de criticidade, gráfico de pareto, medidas do

desempenho do processo, fluxograma do processo, análise da voz do cliente e mapa de raciocínio, sendo que este último foi utilizado no estudo de caso em questão.

A principal proposta da fase de definição é fazer com que todos do time de trabalho obtenham um excelente entendimento sobre o projeto. Garantindo assim, que os esforços sejam direcionados para a solução do problema.

### **3.1.1.1 Mapa de Raciocínio**

Segundo Werkema (2002), o Mapa de Raciocínio permite a documentação de informações que, muitas vezes, são de conhecimento apenas da equipe responsável pelo desenvolvimento do projeto, ou seja, torna possível a retenção, na empresa, do conhecimento gerado e serve como fonte de consulta para o desenvolvimento de projetos similares.

A principal característica desta ferramenta é o seu caráter dinâmico, ou seja: ele deve ser um documento evolutivo, que funciona como um diário de bordo do trabalho. O Mapa de Raciocínio deverá registrar, em tempo real, as perguntas a serem respondidas e os novos conhecimentos adquiridos na busca das respostas a essas perguntas, durante o desenvolvimento do projeto (WERKEMA, 2002).

Mapa de Raciocínio é uma documentação progressiva da forma de raciocínio durante a execução de um trabalho ou projeto. Ele deve documentar:

- A meta inicial do projeto (objetivo inicial);
- As questões às quais a equipe precisou responder durante o desenvolvimento do projeto;
- O que foi feito para responder às questões.

Segundo Werkema (2002), para ser efetivo, o Mapa de Raciocínio deve possuir as seguintes características:

- Apresentar todas as atividades paralelas desenvolvidas durante a execução do projeto;
- Mostrar a relevância das perguntas formuladas, ferramentas utilizadas e atividades realizadas para o alcance da meta inicial do projeto;
- Apresentar referências aos documentos que contêm o detalhamento dos dados e do uso de ferramentas necessárias ao desenvolvimento do projeto.

**Fase**

**Definir**

- Identifique o que é importante para o cliente.
- Defina o escopo do projeto.
- Desenvolva o *charter*...
- Business Case, Problema / Meta, Escopo, Time.
- Defina o Processo

**Ferramenta**

- Mapa Fluxo Valor – Estado Atual/Estado Futuro
- Matriz de Criticidade
- Gráfico de Pareto
- Produto, Medidas do Desempenho do Processo
- Fluxograma do processo
- “Voz” do Cliente
- Mapa de raciocínio

	Produto							ITEMS
	SubProduto A				SubProduto B			
	CTQ1	CTQ2	CTQ3	CTQ4	CTQ5	CTQ6	CTQ7	
Processo A	■	■	■	■	■	■	■	
Processo B	■	■	■	■	■	■	■	
Processo C	■	■	■	■	■	■	■	
Processo D	■	■	■	■	■	■	■	
	Importante para o Cliente							

**Questões para Revisão**

- ❑ 1. Qual é o produto, processo ou serviço a ser melhorado? Como podemos nos alinhar com a estratégia do negócio (e.g., objetivos do negócio)?
- ❑ 2. Quem são os clientes (internos ou externos)? Quem são os grupos primários de pessoas que recebem, usam e contam com a entrega destes produtos processo?
- ❑ 3. O que é importante para o cliente? Quais são as características críticas (crítico para Qualidade, Custo e Entrega) do produto/processo entregue para o cliente?
- ❑ 4. Quais características devem ser escolhidas para serem melhoradas? O que nós não estamos fazendo tão bem quanto o cliente quer que seja feito?
- ❑ 5. Qual é o custo da não qualidade (COPQ)? Quais são os ganhos esperados? Onde os benefícios vão impactar (aumento da capacidade, melhoria da produtividade, redução de defeitos, tempo de ciclo e sucata)?
- ❑ 6. Você tem um time multifuncional e eles estão dispostos a trabalhar em equipe neste projeto para que haja um impacto no produto ou processo final?

**Saídas**

- ❑ Projeto de Alta Prioridade
  - produto/processo a ser melhorado
- ❑ Definição do Projeto
  - indicação do problema
  - objetivo do projeto
  - escopo e limites
  - CTQs
  - dados de suporte
  - membros do time
  - dono do processo
- ❑ Plano do Projeto
  - time
  - recursos
  - custos

**Figura 05:** Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de definição.  
**Fonte:** Adaptado de STAMATIS (2004) e PYZEDEK (2003)

### **3.1.2 Fase de Medição**

Medir é a segunda fase de um projeto Seis Sigma. É nesta fase que o time estabelece técnicas para coleta de dados e avalia a performance atual do processo em estudo. (ECKES, 2003).

Após a conclusão desta fase é esperado que se tenha um plano para a coleta de dados que especifique os tipos de dados e a maneira que os dados precisam ser coletados, um sistema de medição validado e uma amostragem suficiente de dados para a análise.

Para Stamatis (2004), a fase de medição é composta por cinco estágios: identificar os tipos de medições e variações do processo, determinar os tipos de dados, desenvolver um plano de coleta de dados, avaliar o sistema de medição e coletar os dados.

A figura 06 mostra esquematicamente as ferramentas que podem ser utilizadas, algumas questões de revisão e as saídas que devem ser apresentadas ao final da fase de medição de um projeto Seis Sigma, dentre as quais destacam-se o *check list*, análise da capacidade do processo, diagrama de Pareto, mapa de processo e análise do sistema de medição, sendo que os três últimos foram utilizados no estudo de caso em questão.

#### **3.1.2.1 Diagrama de Pareto**

Segundo Hoff (2005), o diagrama de Pareto é uma forma especial do gráfico de barras verticais, que dispõe os itens analisados desde o mais freqüente até o menos freqüente. Tem como objetivo estabelecer prioridades na tomada de decisão, a partir de uma abordagem estatística.

O nome deriva do trabalho de um economista italiano, Vilfredo Pareto, que em 1897 o usou para mostrar que a distribuição da renda era desigual – 80% das riquezas estava nas mãos de 20% da população (MEIRELES, 2001).

Essa mesma conclusão foi depois constatada em outras situações, sendo estabelecida a relação que ficou conhecida como Princípio de Pareto ou a relação 20-80. Segundo esse princípio 20% das causas são responsáveis por 80% dos efeitos.

Mais recentemente Juran aplicou o mesmo diagrama para classificar os problemas de qualidade em vitais e triviais. Juran denominou o método de Análise de Pareto. Através de tal, análise é possível demonstrar que a maioria dos

problemas decorre de um número muito pequeno de causas vitais (MEIRELES, 2001).

A forma gráfica de apresentar os dados estudados por esse método ficou conhecido como gráfico de Pareto ou ainda Diagrama de Pareto.

### **3.1.2.2 Mapa de Processo**

Para Harrington (1997), o processo é definido como qualquer atividade que recebe uma entrada (input), agrega-lhe valor e gera uma saída (output) para um cliente interno ou externo, fazendo uso dos recursos da organização para gerar resultados concretos.

Soliman (1999) diz que, um processo integra pessoas, ferramentas e métodos para executar uma seqüência de passos com o objetivo definido de transformar determinadas entradas em determinadas saídas.

De maneira geral, um processo é composto de entradas, saídas, tempo, espaço, ordenação, objetivos e valores que resultam em uma estrutura para fornecer serviços e produtos aos clientes e através da análise do processo, é possível propor um gerenciamento, no sentido de oferecer melhorias, mediante um prévio mapeamento (PINHO *et. at*, 2007).

O mapa de processo, segundo Barnes (1982), é uma técnica para se registrar um processo de maneira compacta, a fim de tornar possível sua melhor compreensão e posterior melhoria. O mapa representa os diversos passos ou eventos que ocorrem durante a execução de uma tarefa específica, ou durante uma série de ações.

Segundo Werkema (2002), além de apresentar visualmente as etapas e características um processo, ele também mostra as entradas e saídas em cada etapa do processo e pode ser utilizado para auxiliar a realização das seguintes atividades em um processo:

- Delimitação do escopo.
- Visualização dos relacionamentos entre as diversas etapas.
- Identificação dos pontos críticos – nos quais, por exemplo, pode ser necessário coletar dados.
- Localização de “gargalos” e de atividades que não agregam valor. Identificar e classificar as variáveis mais importantes em um processo.

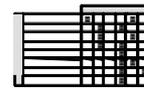
## Fase

### Medir

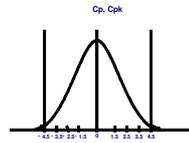
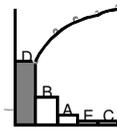
- **Determine o foco do problema i.e. determine o Y(s) do projeto baseado no CTQ's e valide o sistema de medição.**
- **Quantifique o desempenho atual e estime uma meta de melhoria.**

## Ferramenta

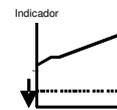
- Mapa de Processo
- Check List
- Diagrama de Pareto
- Análise do Sistema de Medição (MSA), %SV, %P/T etc.
- Análise da Capabilidade do Processo



Mapa Processo



Capabilidade do Processo



Indicador

## Questões para Revisão

- 7. Qual é a sua descrição prática para o problema — o que você está fazendo para consertar ou prevenir?
- 8. Para cada característica crítica escolhida, especificamente o que deve ser medido? Quais Ys devem ser medidos paralelamente? Como você assegurará que você não afeta negativamente outras saídas críticas?
- 9. Quais são as fronteiras do processo, do qual podemos fazer mudanças para melhorar os Ys?
- 10. Que dados existentes estão disponíveis para avaliar o desempenho atual?
- 11. O sistema de medição é adequado? Se não, como pode ser melhorado?
- 12. Quais são as “oportunidades” e defeitos para cada etapa do processo?
- 13. Qual é o desempenho atual do processo? (Cpk, PPM or DPMO, Nível Sigma)?
- 14. Baseado nestas análises, o escopo do projeto está suficientemente reduzido para que se possa estabelecer um foco específico e gerenciável?
- 15. Qual é o objetivo de melhoria **estimado**?

## Saídas

- Problema atualizado
  - Objetivo do Projeto
  - Escopo reduzido do projeto
- Análise do Sistema de Medição Validado
- Baseline Processo/Produto
  - Desempenho (Cpk, PPM ou DPMO, Nível Sigma)
- Objetivo de Melhoria **Estimado**

**Figura 06:** Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de medição.

**Fonte:** Adaptado de STAMATIS (2004) e PYZEDEK (2003)

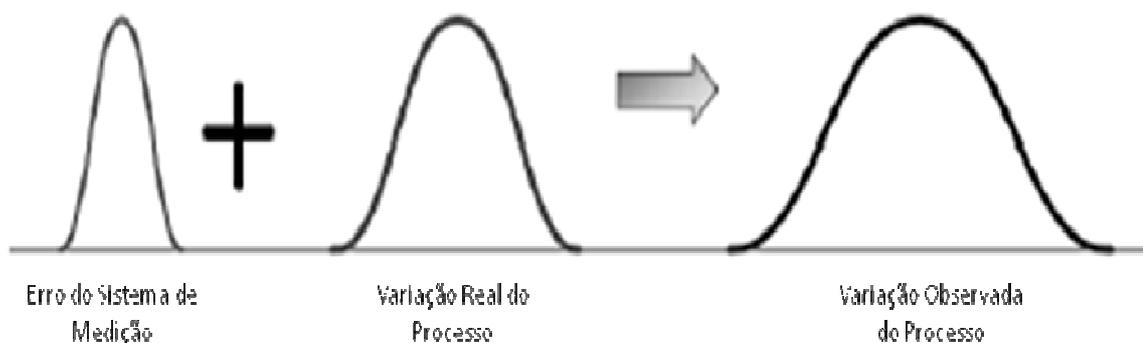
### 3.1.2.3 Análise do Sistema de Medição – MSA

Silva, (2002) cita em seu artigo o Manual de MSA da QS-9000, onde o sistema de medição é definido como o conjunto de operações, procedimentos, dispositivos de medição e outros equipamentos, software e pessoal usado para atribuir um valor à característica que está sendo medida.

A execução de estudos de MSA consiste na aplicação de técnicas estatísticas que têm por objetivo descreverem o tamanho e os tipos de variações dos resultados gerados por um sistema de medição, quando este é posto em operação em suas condições reais de trabalho (SILVA, 2002).

Para Silva (2007), a análise do sistema de medição é importante para se garantir a consistência dos controles nos processos de fabricação, sobretudo no recebimento, processo e aprovação final e seu principal objetivo é avaliar a qualidade dos dados medidos pelo sistema de medição e prover subsídios para tomada de decisão.

Segundo Silva (2007), os erros de medição afetam a variabilidade do processo. Sua influencia pode ser representada pela Figura 07.



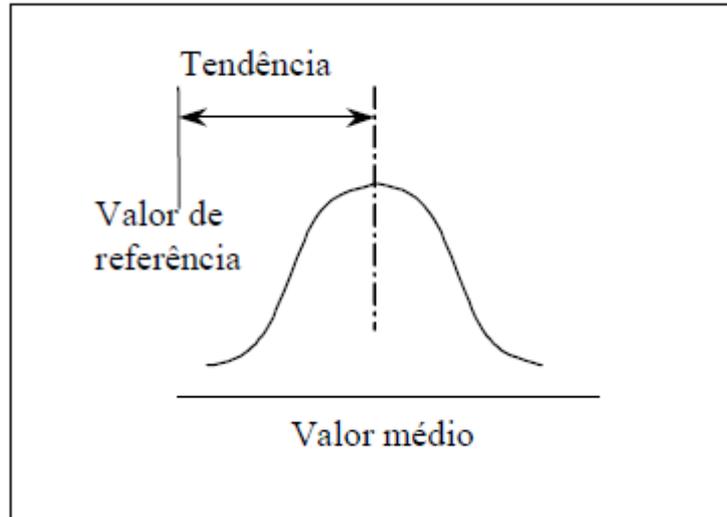
**Figura 07:** Influencia do sistema de medição na variação observada do processo.

**Fonte:** Adaptado de SILVA (2007)

A análise do sistema de medição avalia as propriedades estatísticas relacionadas às medidas de posição e variação do sistema de medição, destacando se as seguintes características: Tendência, Linearidade, Estabilidade, Repetitividade e Reprodutibilidade.

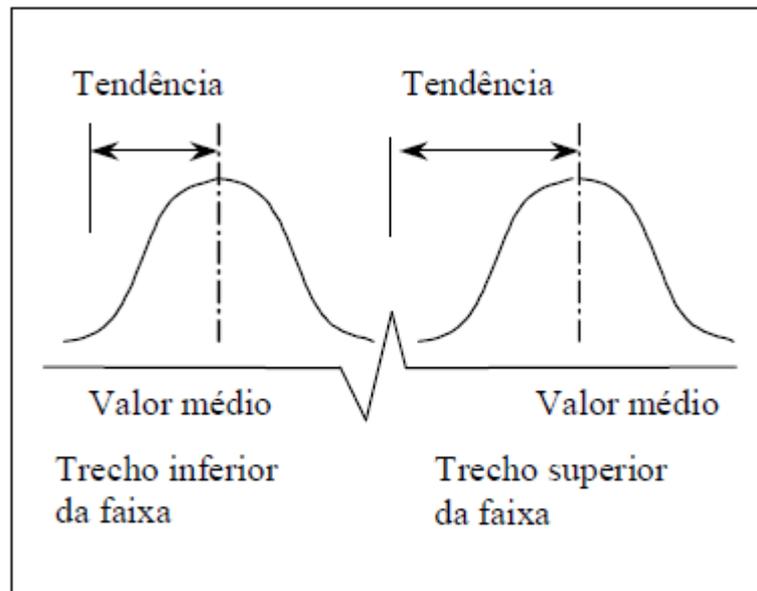
Conforme descrito no Manual de MSA (ANFAVEA, 1997):

- Tendência é a diferença entre a média observada das medições e o valor de referência (figura 08).



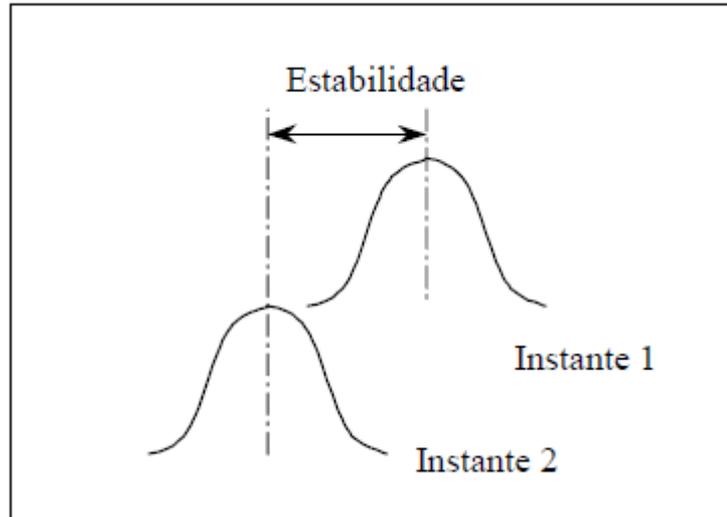
**Figura 08:** Tendência.  
**Fonte:** Adaptado de SILVA (2002)

- Linearidade é a diferença nos valores da tendência ao longo da faixa de operação esperada do dispositivo de medição (figura 09).

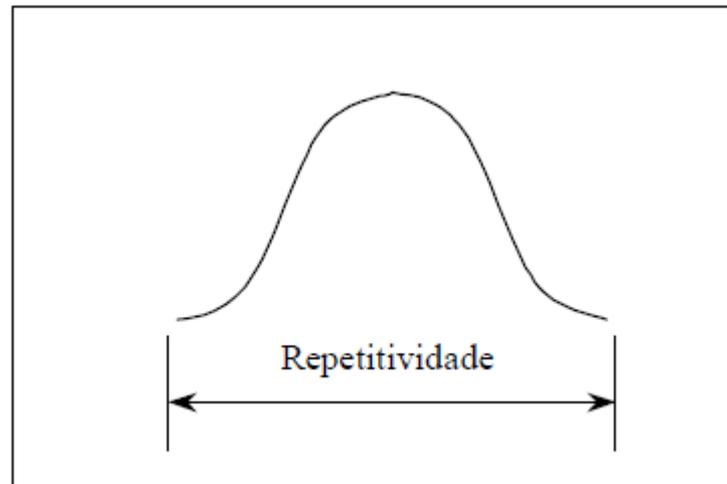


**Figura 09:** Linearidade  
**Fonte:** Adaptado de SILVA (2002)

- Estabilidade é a variação total nas medidas obtidas com o sistema de medição medindo uma única característica na mesma peça ou padrão ao longo de um extenso período de tempo (figura 10).
- Repetitividade é a variação nas medidas obtidas com um dispositivo de medição quando usado várias vezes por um operador medindo a mesma característica na mesma peça (figura 11).



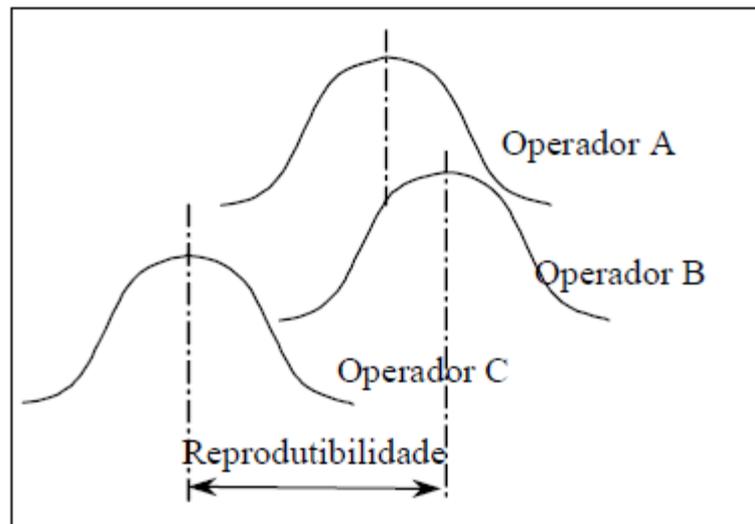
**Figura 10:** Estabilidade.  
**Fonte:** Adaptado de SILVA (2002)



**Figura 11:** Repetitividade.  
**Fonte:** Adaptado de SILVA (2002)

- Reprodutibilidade é a variação na média das medidas feitas por diferentes operadores utilizando o mesmo dispositivo de medição medindo característica idêntica nas mesmas peças (figura 12).

Numa seleção de um sistema de medição, tem-se a preocupação de determinar aquele que seja capaz de detectar e indicar confiavelmente até mesmo pequenas mudanças na característica medida, isto é, que tenha melhor resolução. Devido a limitações, sejam elas de origens econômicas ou físicas, um sistema de medição pode ter suas variações e, conseqüentemente, suas propriedades estatísticas afetadas (ROTONDARO, 2002).



**Figura 12:** Reprodutibilidade.  
**Fonte:** Adaptado de SILVA (2002)

No estudo de caso em questão, a análise do sistema de medição foi realizada através da repetitividade e da reprodutibilidade. Visto que as saídas analisadas são qualitativas, a repetitividade e reprodutibilidade são avaliados através do nível de concordância e para concluir que o sistema de medição é adequado, os valores do nível de concordância deve ser igual ou superior a 70% (KEITH e BOWER, 2001).

### 3.1.3 Fase de Análise

**Analisar** é a terceira fase de um projeto Seis Sigma. É durante esta fase que o time analisa os dados coletados com o intuito de determinar a causa raiz da baixa performance do processo (ECKES, 2003).

A análise dos dados é o elemento mais importante do modelo de melhoria do processo, pois é nesta fase que se faz a descoberta da razão da existência do problema. Se a fase de análise for superficial a identificação da causa raiz do problema também o será.

Durante todo o projeto Seis Sigma o time trabalhará com as entradas e saídas críticas do processo, a fase de análise contribui para a redução dos fatores de entrada indicando quais deles apresentam maior influência sobre as saídas.

Segundo Stamatis (2004), a fase de análise é composta por três tarefas: avaliar a capacidade atual do processo, selecionar as ferramentas de análise e aplicar ferramentas de análise gráfica.

A figura 13 mostra esquematicamente as ferramentas que podem ser utilizadas, algumas questões de revisão e as saídas que devem ser apresentadas ao final da fase de análise de um projeto Seis Sigma, dentre as quais destacam-se o diagrama de causa e efeito, análise dos efeitos e modos de falha, teste de hipóteses, delineamento de experimentos, matriz de causa e efeito, análise estatística multivariada e análise de regressão, sendo que os três últimos foram utilizados no estudo de caso em questão.

### **3.1.3.1 Matriz de Causa e Efeito**

Segundo Matos e Caten (2002), a matriz de causa e efeito é uma matriz de processos do QFD (Quality Function Deployment ou Desdobramento da Função Qualidade) usada para relacionar e priorizar as variáveis de entrada (X's) com as variáveis de saída do processo (Y's), através de uma ordenação numérica, usando como fonte primária o mapeamento do processo. O objetivo desta matriz é evidenciar as variáveis de entrada do processo que estão associadas com as principais saídas, para auxiliar na identificação das variáveis de entrada críticas para a qualidade do produto que devem ser monitoradas e/ou otimizadas.

O preenchimento da matriz de causa e efeito permite a visualização da importância de cada variável constituinte do processo. Com o resultado desta matriz se obtém um Pareto dos X's que pode ser usado como ponto de partida na elaboração de experimentos, do FMEA (Análise do Modo e Efeito de Falha), e de planos de controle (MATOS; CATEN, 2002).

Segundo Ribeiro, Echeveste e Danilevicz (2001), para a elaboração da matriz de causa e efeito do processo é necessário que se identifiquem corretamente os aspectos que o cliente valoriza. A priorização dos itens de qualidade demandada é calculada levando-se em consideração a importância de cada item da qualidade demandada, avaliação estratégica, avaliação competitiva, ou outras avaliações que podem ser pertinentes em aplicações específicas.

Neste estudo o índice de importância definido pelos clientes foi avaliado com base no conhecimento técnico dos componentes do time de trabalho, considerando-se na avaliação a importância de cada item para o cliente e aspectos estratégicos da empresa, como impacto nos custos e na produtividade. A escala utilizada teve uma pontuação de 1 a 10, onde a saída mais importante recebeu o número mais alto.

**Fase**

Analizar

- Caracterize a resposta, olhe os dados brutos, Bimodal? Distorcido? Outras Pistas?
- O problema está com média ou variação?
- Análise de falhas: Onde você está Versus Onde você queria estar?
- Identifique as causas (Xs) de variação e defeito.

- Providencie evidencia estatísticas de que as causas são reais.
- Consigne com o objetivo de melhoria de Y.

**Ferramenta**

- Diagrama de Causa e Efeito
- Matriz de Cause e Efeito
- Análise de Efeitos & Modos de Falha (FMEA)
- Análise Multivariada
- Correlação e Regressão
- Teste de Hipóteses
- Delineamento de Experimentos

**Questões para Revisão**

- 16. A resposta é discreta ou contínua? Se discreta, você tentou encontrar uma resposta contínua?
- 17. Quanto do problema, como descrito na fase de Medir, você irá analisar em seguida?
- 18. Quais são as possíveis causas para a saída indesejável (variação ou defeito) que foi selecionado para melhoria?
- 19. Quais causas são mais prováveis e quais tem maior contribuição? Quais são as principais variáveis de entrada do processo (Xs)?
- 20. Quais causas são controladas pelo time? Quais são os limites externos do projeto (e.g., fornecedor)?
- 21. Como estas causas de maior suspeita podem ser verificadas? Que dados devem ser coletados e que testes estatísticos serão usados?
- 22. Baseado nas análises de Xs, qual o foco de melhoria que o time pode empenhar-se?

**Saídas**

- Verificado Causas de Defeitos/Variação
- X's de pouca importância podem ser experimentados
- Empenho no objetivo de melhoria

**Figura 13:** Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de análise.  
**Fonte:** Adaptado de STAMATIS (2004) e PYZEDEK (2003)

Todas as entradas foram avaliadas e classificadas de acordo com o impacto das mesmas sobre as saídas selecionadas. E a classificação foi feita de acordo com a pontuação 0, 1, 3 e 9, onde:

- 0 – A variável de entrada (X) não apresenta nenhum impacto sobre a variável de saída (Y);

- 1 – A variável de entrada (X) apresenta baixo impacto sobre a variável de saída (Y);
- 3 – A variável de entrada (X) apresenta médio impacto sobre a variável de saída (Y);
- 9 – A variável de entrada (X) apresenta alto impacto sobre a variável de saída (Y);

A seleção das variáveis de entrada que mais têm impacto sobre as variáveis de saída é feito através da equação 02, onde:

$$\text{ImpactoTotal} = \sum \text{Pontuação de Entrada} \times \text{Índice de Importância} \quad \text{Equação 02}$$

Vale ressaltar que a Matriz de Causa e Efeito é uma ferramenta subjetiva, que depende do conhecimento dos componentes do time e é importante que seja feita uma análise crítica sobre a matriz para verificar se existe alguma variável de entrada importante que não foi classificada dentro da linha de corte definida pelo time.

### 3.1.3.2 Análise Estatística Multivariada

Segundo Bakke, Leite e Silva (2008), a Estatística Multivariada é uma ferramenta poderosa na análise de dados, pois consiste em um conjunto de métodos estatísticos que permite confrontar diversas variáveis simultaneamente de cada elemento amostral. As técnicas de estatística multivariada têm o propósito de simplificar ou facilitar a interpretação do fenômeno estudado e o seu desenvolvimento tem possibilitado o estudo acurado de fenômenos cada vez mais complexos. Podem ser empregadas com o intuito de se construir índices ou variáveis alternativas e grupos de elementos amostrais, analisar as relações de dependência das variáveis e comparar as populações.

De acordo com Escofier e Pages (1992), os métodos de análise de dados multivariados têm comprovado amplamente sua eficácia no estudo de grandes massas de informação complexas. Trata-se de métodos chamados de multidimensionais que permitem a confrontação entre duas ou mais variáveis. Pode-se, então, extrair-se as tendências mais sobressalentes e hierarquizá-las, eliminando os efeitos que perturbam a percepção global.

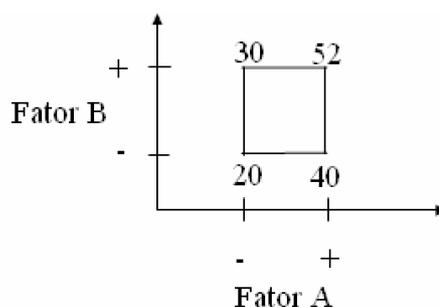
A estatística multivariada pode ser aplicada com diversas finalidades, mesmo nos casos em que não se dispõe de antemão de um modelo teórico rigorosamente estruturado a respeito das relações entre as variáveis. A finalidade de sua aplicação pode ser de reduzir os dados ou de simplificação estrutural, de classificar e agrupar, de investigar a dependência entre variáveis, de predição e de elaborar hipóteses e testá-las (JOHNSON; WICHERN, 1992).

Segundo Ferreira (1996), os objetivos da estatística multivariada são:

- Redução de dados ou simplificação estrutural: o fenômeno sob estudo é representado da maneira mais simples possível, sem sacrificar informações valiosas e tornando as interpretações mais simples;
- Ordenação e agrupamento: agrupamento de objetos (tratamentos) ou variáveis similares, baseados em dados amostrais ou experimentais;
- Investigação da dependência entre variáveis: estudos das relações estruturais entre variáveis muitas vezes é de interesse do pesquisador;
- Predição: relações entre variáveis devem ser determinadas para o propósito de predição de uma ou mais variável com base na observação de outras variáveis;
- Construção e teste de hipóteses.

### 3.1.3.2.1 Gráfico de Efeitos Principais

Segundo Ramm (2007), efeito principal de um fator é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado, ou seja, é o quanto mudou a média da variável resposta devido a mudança do nível do fator. A figura 14 mostra o gráfico para os efeitos principais em um experimento com dois fatores.



**Figura 14:** Efeitos principais para um experimento de dois fatores  
**Fonte:** Montgomery (1991)

Para os dados apresentados na figura 09, o efeito principal de A será:

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21 \quad \text{Equação 03}$$

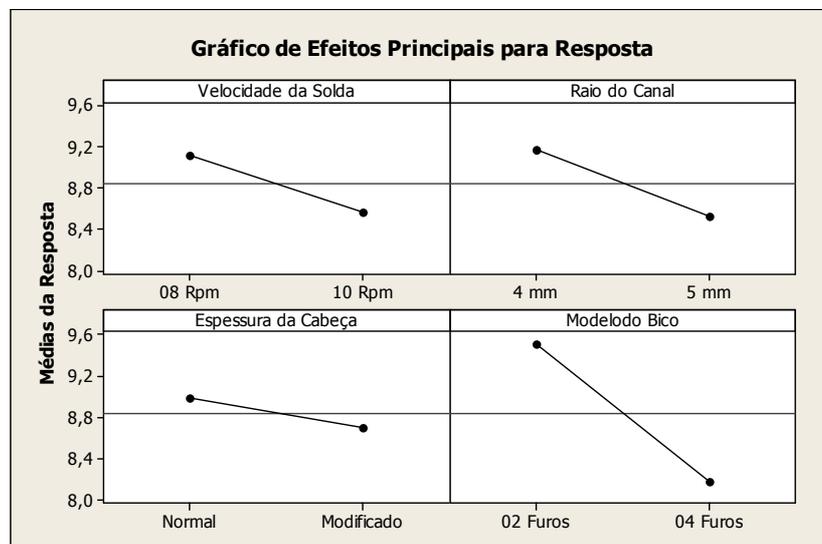
A interpretação seria que, passando do nível baixo para o alto de A, há um aumento médio de 21 unidades na resposta. O gráfico 01 mostra um exemplo de um gráfico de efeitos principais.

O efeito principal é calculado como a média dos efeitos individuais e permite definir qual o efeito médio da variável examinada sobre as condições das demais variáveis. Matematicamente o efeito principal pode ser representado pela equação 04:

$$\text{Efeito Principal} = \frac{2 \times (\sum y^+ - \sum y^-)}{b^a} \quad \text{Equação 04}$$

Em que  $y$  corresponde ao valor da resposta para um determinado tratamento, (+) e (-) correspondem aos níveis alto e baixo respectivamente e  $b^a$  corresponde ao número total de experimentos do planejamento.

Segundo Ramm (2007), O gráfico de Efeitos Principais é uma representação das médias para cada nível de um determinado fator. Para este gráfico, as médias para cada nível de um dado fator são conectadas com uma linha. Horizontalmente também fica representada a linha da média total do experimento.



**Gráfico 01:** Exemplo de um gráfico de efeitos principais

Quando o coeficiente angular da reta que une as médias para cada nível de um dado fator for positivo, o efeito é dito como positivo, ou seja, alternando do nível “-1” para o nível “+1” a média da variável de resposta tende a aumentar. O contrário acontece para o caso do coeficiente angular da reta ser negativo.

### **3.1.3.3 Análise de Regressão Linear Simples**

Segundo Devore (2006), o objetivo de grande parte dos cálculos é investigar as variáveis que estão relacionadas deterministicamente. Afirmar que  $x$  e  $y$  estão relacionados desta maneira significa dizer que o conhecimento do valor de  $x$  implica no conhecimento exato do valor de  $y$ .

A análise de regressão é a parte da estatística que investiga a relação entre duas ou mais variáveis relacionadas de maneira não determinística (DEVORE, 2006).

Se duas variáveis não estiverem relacionadas deterministicamente, então para um valor fixo de  $x$ , o valor da segunda variável será aleatório. Na maioria das vezes, a variável cujo valor é fixado será representado por  $x$  e será chamado de variável independente. Para  $x$  fixo, a segunda variável será aleatória e a mesma é representada por  $y$  e será chamada de variável dependente ou resposta (DEVORE, 2006).

Em geral, as observações serão feitas para inúmeros conjuntos da variável independente ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) e terá como resposta os valores dependentes ( $y_1, y_2, \dots, y_n$ ). Portanto, os dados bivariados fornecidos consistem nos vários pares formados por  $x$  e  $y$  ( $x_1, y_1$ ), ( $x_2, y_2$ ), ..., ( $x_n, y_n$ ) (DEVORE, 2006).

No estudo de caso em questão as análises de regressão utilizadas foram do tipo linear simples, portanto apenas esta será abordada e discutida neste trabalho.

O modelo de regressão é chamado de simples quando envolve uma relação causal entre duas variáveis, ou seja, quando a função  $f$  que relaciona duas variáveis é do tipo  $f(X) = a + bX$  (TORRES, HADDAD e ONO, 2009).

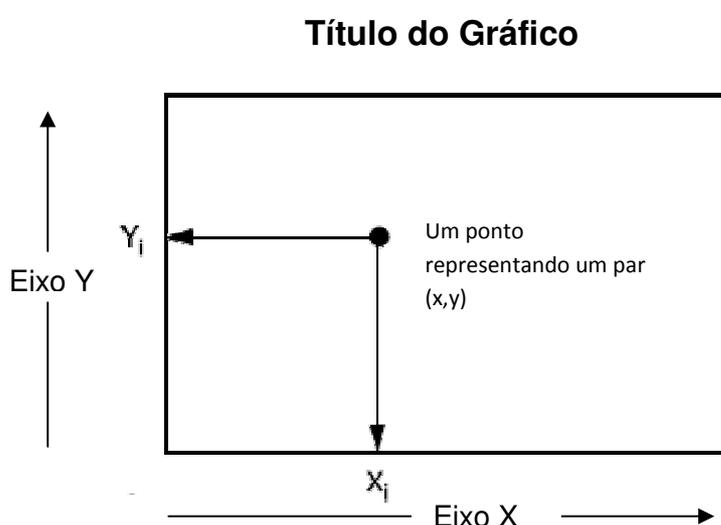
O primeiro passo na análise de regressão com duas variáveis é elaborar um gráfico de dispersão dos dados observados. Em um gráfico deste tipo, cada  $(x_i, y_i)$  é representado como um ponto representado graficamente em um sistema de coordenadas bidimensional.

Ao se plotar num gráfico cartesiano os pares de informação referente a cada observação obtemos uma “nuvem” de pontos definidos pelas coordenadas  $x$  e  $y$  de

cada ponto. Essa “nuvem”, por sua vez, definirá um eixo ou direção que caracterizará o padrão de relacionamento entre X e Y.

A regressão será linear se observada uma tendência ou eixo linear na “nuvem” de pontos cartesianos. A relação entre as variáveis será direta (ou positiva) quando os valores de Y aumentarem em decorrência da elevação dos valores de X. Será inversa (ou negativa) quando os valores de Y variarem inversamente em relação aos de X (SILVA, 2007).

A figura 15 mostra como plotar os pontos em um gráfico cartesiano para a construção de um diagrama de dispersão.



**Figura 15:** Exemplo de como construir um diagrama de dispersão  
**Fonte:** Adaptado de PYZEDEK, 2003

Um diagrama de dispersão pode apresentar vários padrões que devem ser interpretados de maneiras diferentes, conforme indicado na figura 16.

Por meio do coeficiente de correlação linear, pode-se estudar o grau de associação que existe entre duas variáveis, procurando determinar, quão bem uma equação linear ou de outra espécie descreve ou explica uma relação entre as variáveis. A correlação linear, portanto, procura prever o grau de dependência entre duas variáveis (SILVA, 2007).

Um diagrama de dispersão mostra a localização dos pontos em um sistema de coordenadas cartesianas. Se os pontos deste diagrama estiverem alinhados, a correlação é denominada correlação linear. Se os pontos estiverem na forma de uma curva não linear, a correlação é denominada não linear, e uma equação não

linear será apropriada para a regressão ou estimativa dos parâmetros da curva (SILVA, 2007).

Segundo Torres, Haddad e Ono (2009), regressão é o processo matemático pelo qual derivamos os parâmetros “a” e “b” de uma função  $f(X)$ . Estes parâmetros determinam as características da função que relaciona ‘Y’ com ‘X’ que no caso do modelo linear se representa por uma reta chamada de reta de regressão. Esta reta explica de forma geral e teoricamente a relação entre X e Y. Isto significa que os valores observados de X e Y nem sempre serão iguais aos valores de X’ e Y’ estimados pela reta de regressão. Haverá sempre alguma diferença, e essa diferença significa:

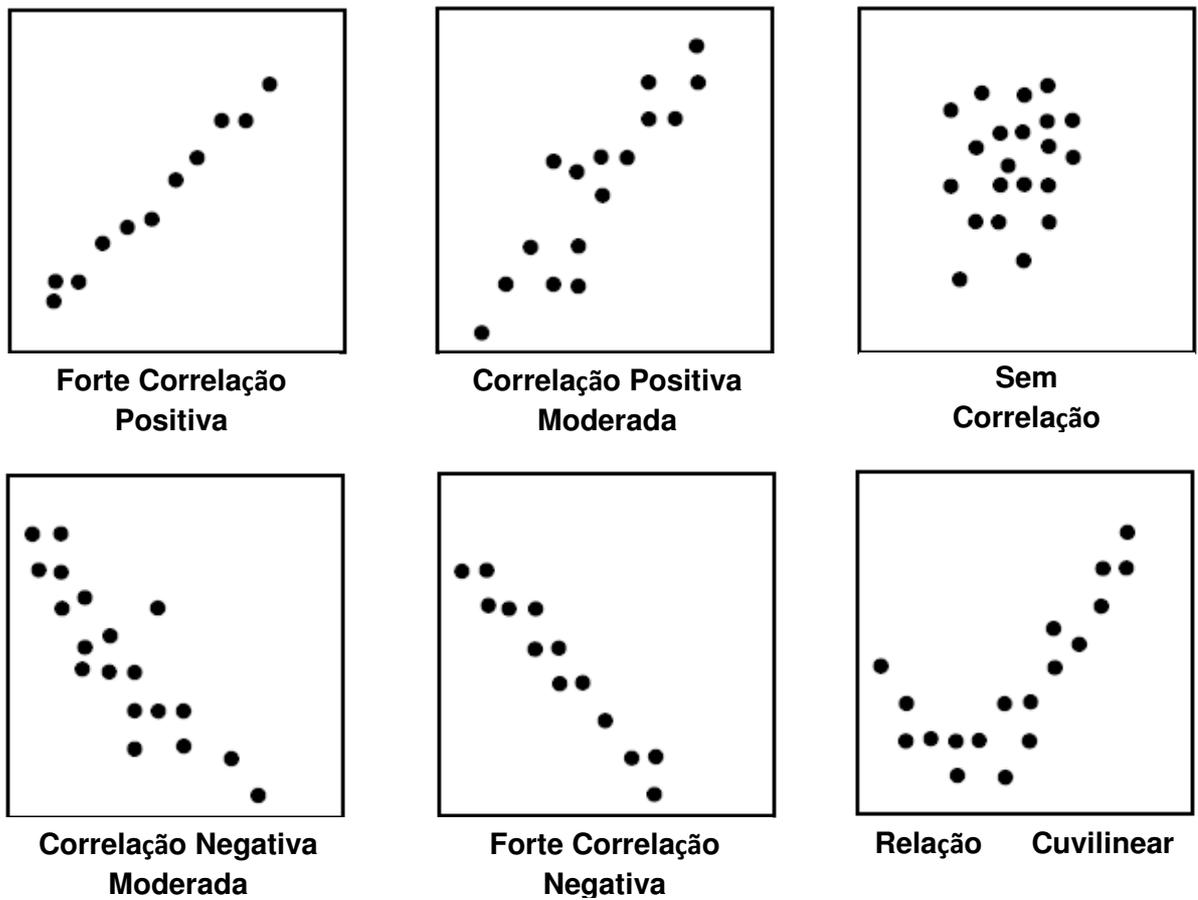
- que as variações de Y não são perfeitamente explicadas pelas variações de X ou;
- que existem outras variáveis das quais Y depende ou;
- que os valores de X e Y são obtidos de uma amostra específica que apresenta distorções em relação a realidade.

O processo de regressão significa, portanto, que os pontos plotados no gráfico são definidos, modelados ou regredidos, a uma reta que corresponde à menor distância possível entre cada ponto plotado e a reta. Em outras palavras, busca-se reduzir ao mínimo possível os somatórios dos desvios entre Y e Y’.

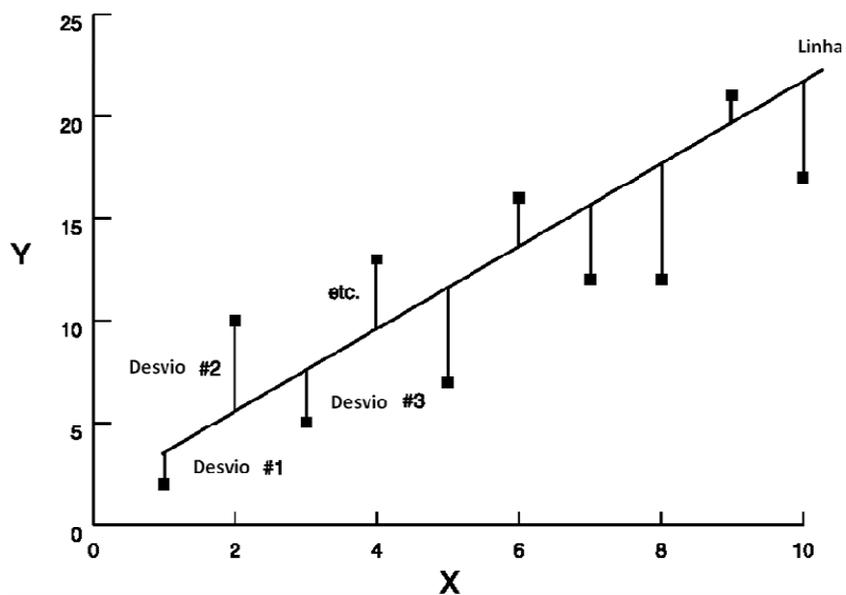
A curva de regressão é definida pelo método dos mínimos quadrados. Esse método definirá uma reta que minimizará a soma das distâncias ao quadrado entre os pontos plotados (X, Y) e a reta (X’, Y’). Pelo método dos mínimos quadrados calculam-se os parâmetros “a” e “b” da reta que minimiza estas distâncias ou as diferenças (ou o erro) entre Y e Y’. A figura 17, mostra de forma esquemática uma curva de regressão.

Segundo Torres, Haddad e Ono (2009), a reta de regressão que se obtém através do método dos mínimos quadrados é apenas uma aproximação da realidade, ela é um modo útil para indicar a tendência dos dados. Porém para indicação do quanto útil ou aproximado da realidade é a reta, utiliza-se duas medidas:

- Erro padrão da estimativa ( $S_e$ );
- Coeficiente de determinação ( $r^2$ ).



**Figura 16:** Guia de interpretação do diagrama de dispersão  
**Fonte:** Adaptado de PYZEDEK, 2003



**Figura 17:** Curva de regressão  
**Fonte:** Adaptado de PYZEDEK, 2003

### 3.1.3.3.1 Coeficiente de Determinação ( $r^2$ )

Segundo Silva (2007), o chamado coeficiente de determinação linear ( $r^2$ ) é o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. Para a equação da reta de regressão, em estatística descritiva, o coeficiente de correlação de Pearson, também chamado de "coeficiente de correlação" ou simplesmente de " $r$  de Pearson", que mede o grau da correlação entre as duas variáveis e a direção dessa correlação.

Este coeficiente, normalmente representado pela letra " $r$ " assume apenas valores entre  $-1$  e  $1$ .

- $r = 1$  Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.
- $r = -1$  Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis.
- $r = 0$  Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra, no entanto, pode existir uma dependência que seja "não linear".

Segundo Silva (2007), ao se analisar a reta de regressão observa-se que os pontos  $(x_i, y_i)$  estão distribuídos acima e abaixo da mesma. Na figura 18 é relacionado cada ponto  $Y$ , com o seu valor estimado e com o valor médio  $Y^*$ . Como podemos observar a diferença entre o valor de  $Y$  e o valor de  $Y^*$  é o desvio total do ponto em relação a sua média.

A soma dos desvios ao quadrado de todos os pontos em relação a média de  $Y$  é chamada de *Varição Total*. Isto é:

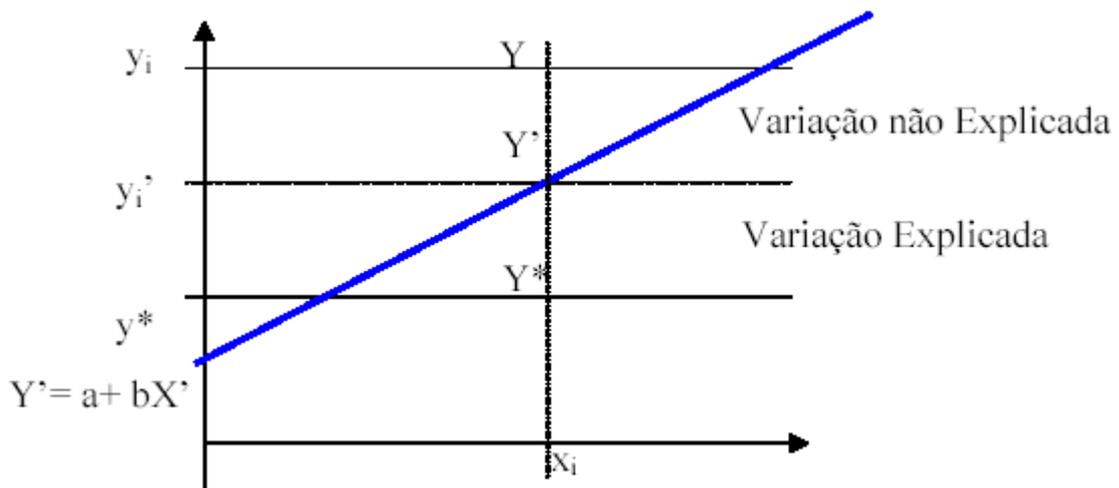
$$\sum (Y - Y^*)^2 \quad \text{Equação 05}$$

A diferença entre o valor de um ponto  $Y$  ( $x_i, y_i$ ) e seu valor estimado  $Y'$  ( $x_i', y_i'$ ) isto é a distancia entre o ponto  $Y$  e a reta de regressão, é chamada de *Varição Não Explicada* pela reta de regressão. Isto é:

$$\sum (Y - Y')^2 \quad \text{Equação 06}$$

Já a diferença entre o valor  $Y'$  (estimativa de  $Y$ ) situado sobre a reta de regressão e o valor médio de  $Y^*$  (situado sobre a reta paralela ao eixo  $x$ ) é conhecida como *Varição Explicada* pela reta de regressão. Isto é:

$$\sum (Y' - Y^*)^2 \quad \text{Equação 07}$$



**Figura 18:** Gráfico de explicação do coeficiente de determinação  
**Fonte:** adaptado de Silva (2007)

Conforme mostrado na figura 13, a variação total é explicada através da equação 08 e o coeficiente de determinação  $r^2$  é definido pela relação mostrada na Equação 09:

$$\text{Variação Total} = \text{Variação Não Explicada} + \text{Variação Explicada}$$

$$\sum (Y - Y^*)^2 = \sum (Y - Y'^2) + \sum (Y' - Y^*)^2 \quad \text{Equação 08}$$

$$r^2 = \frac{\sum (Y' - Y^*)^2}{\sum (Y - Y^*)^2} = \frac{\text{Variação Explicada}}{\text{Variação Total}} \quad \text{Equação 09}$$

O coeficiente de determinação deve ser interpretado como a proporção de variação total da variável dependente Y que é explicada pela variação da variável independente X.

### 3.1.4 Fase de Melhoria (Improve)

Melhorar (Improve) é a quarta fase de um projeto Seis Sigma. Nesta fase busca-se confirmar quais são as poucas entradas do processo (X's) que causam impacto na sua saída (Y) (ECKES, 2003).

É durante esta fase que o time gera e implementa idéias para eliminar a causa raiz encontrada na fase de análise e deve conduzir pilotos experimentais, avaliar e validar, através de métodos estatísticos, as melhorias propostas.

Segundo Stamatis (2004), a fase de melhoria é composta por cinco estágios: Elaborar alternativas de melhorias para ser testadas, criar um mapa de processo “ideal”, conduzir a análise dos efeitos e modos de falha (FMEA), realizar uma análise de custo-benefício, conduzir um piloto com a melhoria proposta e validar a melhoria através de ferramentas estatísticas.

A figura 19 mostra esquematicamente as ferramentas que podem ser utilizadas, algumas questões de revisão e as saídas que devem ser apresentadas ao final da fase de melhoria de um projeto Seis Sigma, dentre as quais destacam-se o sistema aprova de erros, avaliação da tolerância estatística, análise de efeitos e modos de falha, teste de hipóteses e delineamento de experimentos, sendo que este último foi utilizados no estudo de caso em questão.

#### **3.1.4.1 Delineamento de Experimentos**

Os experimentos (ou experiências) vêm sendo utilizados pelo homem há muito tempo, como forma de adquirir conhecimento acerca de fenômenos sobre os quais este não tem informação suficiente. Somente é possível melhorar o que se conhece e entende bem (ROTONDARO, 2002).

Segundo Rotondaro (2002), o delineamento de experimentos são testes conduzidos de forma planejada, em que as entradas (ou fatores ou variáveis controladas) são alteradas de modo planejado para avaliar seu impacto sobre uma saída (ou resposta).

Os objetivos do delineamento de experimentos são:

- Determinar que fatores de entrada (X's) possuem maiores influência sobre a resposta (Y);
- Determinar como ajustar os fatores (X's), de modo que a resposta (Y) tenha o valor desejado;
- Determinar como ajustar os (X's) de modo que a variação da resposta (Y) seja a menor possível;
- Determinar como ajustar os fatores (X's) de modo que os efeitos das variáveis não controladas (Z's) sobre a resposta (Y) seja mínimo.

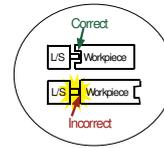
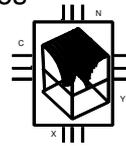
## Fase

### Melhorar

- Confirmar se os X(s) vitais são significantes:
  - Impacto, Direção, Interações
  - Determine soluções (maneiras de neutralizar a causa) incluindo níveis operacionais e tolerâncias.
- Instale as soluções e providencie evidências estatísticas que as soluções estão funcionando.

## Ferramenta

- Desenvolvimento de Experimentos (DOE)
- Sistema a Prova de Erros
- Tolerância Estatística
- Análise de Efeito & Modo de Falha (FMEA)
- Teste de Hipóteses



## Questões para Revisão

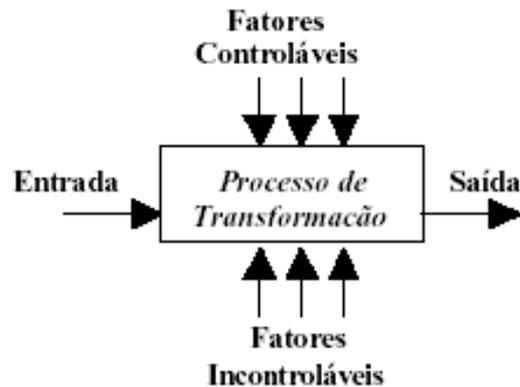
- ❑ 23. Para cada causa (X) verificada, quais são as possíveis maneiras para neutralizar a causa?
- ❑ 24. Os poucos X's são estatisticamente significativos?
- ❑ 25. Os efeitos são de significância prática?
- ❑ 26. Sobre as possíveis soluções, quais são as mais efetivas, fáceis e baratas para se implementar?
- ❑ 27. Para cada importante variável de entrada (X), qual são os melhores ajustes e tolerâncias?
- ❑ 28. Como cada solução pode ser verificada com dados, antes da implementação total?
- ❑ 29. Estas soluções permitirão que Atinjamos nossa meta de melhoria? Se não, onde falhamos? Qual será o impacto em Y?
- ❑ 30. Qual será o efeito colateral previsto em Y?
- ❑ 31. Como implantaremos todas soluções em escala total (O que, Onde, Quando, Como, Quem?) O dono do processo está empenhado na implantação das soluções?
- ❑ 32. Existe algum outro projeto como este sendo desenvolvido?

## Saídas

- ❑ Soluções para neutralizar as Causas
- ❑ Melhores ajustes e Tolerâncias para as principais Variáveis do Processo de Entrada (Xs)
- ❑ Prestação das Soluções em Pequena Escala & Dados verificando seu impacto em Y
- ❑ Avaliação do Impacto em Y
- ❑ Implementação em Escala Total das Soluções
- ❑ Novo Mapa de Processo
- ❑ Lista dos aprendizados adquiridos.

**Figura 19:** Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de melhoria.  
**Fonte:** Adaptado de STAMATIS (2004) e PYZEDEK (2003)

A figura 20 mostra a relação entre as entradas e saídas de um processo.



**Figura 20:** Modelo geral de um processo ou sistema  
**Fonte:** MONTGOMERY, 1991

Os fatores são as variáveis independentes ou entradas do processo (X's), os níveis são os possíveis valores que os fatores podem assumir no experimento e a resposta é a variável dependente do experimento ou a saída do processo (Y), que será empregada para avaliar a influência dos fatores (ROTONDARO, 2002).

Das diversas categorias de experimentos existentes, os fatoriais completos  $2^k$  (onde k é o número de fatores do experimento) são um dos mais importantes na otimização dos processos. Neste tipo de experimento todas as possíveis combinações entre níveis e fatores são analisadas, permitindo assim uma melhor avaliação dos resultados finais.

Depois de calculados os efeitos principais e as interações, é preciso avaliar se estes são estatisticamente significativos ou não. Ou seja, o fato de um efeito ter resultado superior aos outros não significa, necessariamente, que este seja influente na resposta.

A análise dos efeitos pode ser feita de três diferentes modos: utilizando a análise de variância (ANOVA), utilizando o diagrama de Pareto ou o gráfico de probabilidade normal, estes dois últimos serão detalhados no item 3.1.4.1.1 e 3.1.4.1.2.

O método de análise de variância (ANOVA) baseia-se em particionar a variância total de uma determinada resposta (variável dependente) em duas partes: a primeira devida ao modelo de regressão e a segunda devida aos resíduos (erros) (LIMA, 2009).

Se forem efetuadas replicações de determinadas experiências, a ANOVA também permite decompor a variação dos resíduos numa parte relacionada com o erro do modelo e outra parte relacionada com o erro de replicação .

Segundo Lima (2009), em um experimento, cada observação  $Y_{ij}$  pode ser decomposta conforme o modelo a seguir (Equação 11):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad i = 1, \dots, I \text{ e } j = 1, \dots, J \quad \text{Equação 10}$$

em que:

- $Y_{ij}$  é a observação do  $i$ -ésimo tratamento na  $j$ -ésima unidade experimental ou parcela;
- $\mu$  é o efeito constante (média geral) ;
- $\tau_i$  é o efeito da  $i$ -ésima variável independente;
- $\epsilon_{ij}$  é o erro associado a  $i$ -ésima variável independente na  $j$ -ésima unidade experimental ou parcela assumida como:  $\epsilon_{ij} \sim^{IID} N(0, \sigma^2)$ . Aqui, *IID* significa que os erros devem ser independentes e identicamente distribuídos.

Em um experimento, existe o interesse em testar se há diferenças entre as médias dos tratamentos, o que equivale a testar as hipóteses:

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I \\ H_1 : \mu_i \neq \mu_{i'} \text{ para pelo menos um par } (i, i'), \text{ com } i \neq i' \end{cases}$$

em que:

$$\mu_i = \mu + \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

De forma equivalente, podemos escrever tais hipóteses da seguinte forma:

$$\begin{cases} H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_I = 0 \\ H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ para pelo menos um } i . \end{cases}$$

Note que, se a hipótese nula for verdadeira, todos os tratamentos terão uma média comum  $\mu$ .

Segundo Lima (2008), a análise de variância baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes que podem ser atribuídas aos tratamentos (variância entre) e ao erro experimental (variância dentro). Essa

variação pode ser medida por meio das somas de quadrados definidas para cada um dos seguintes componentes (equação 11 e 12):

$$SQ_{Total} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij}^2 - C, \text{ em que } C = \frac{\left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij} \right)^2}{IJ} \quad \text{Equação 11}$$

$$SQ_{Trat} = \sum_{i=1}^I y_i^2 - C \quad \text{Equação 12}$$

E a soma de quadrados dos resíduos pode ser obtida por diferença (equação 13):

$$SQ_{Res} = SQ_{total} - SQ_{Trat}. \quad \text{Equação 13}$$

A  $SQ_{Trat}$  também é chamada de *variação Entre (between)*, que é a variação existente entre os diferentes tratamentos e a  $SQ_{Res}$  é chamada de *variação Dentro (within)* que é função das diferenças existentes entre as repetições de um mesmo tratamento. Essas somas de quadrados podem ser organizadas em uma tabela, denominada tabela da análise de variância, como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 02:** Tabela da Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F calculado
Tratamentos	I-1	SQ <sub>Trat</sub>	QM <sub>Trat</sub>	QM <sub>Trat</sub> /QM <sub>Res</sub>
Resíduo	I(J-1)	SQ <sub>Res</sub>	QM <sub>Res</sub>	
Total	IJ-1	SQ <sub>Total</sub>		

**Fonte:** adaptado de LIMA, 2009

Em que:

$$QM_{Trat} = SQ_{Trat} / (I - 1) \quad \text{Equação 14}$$

$$QM_{Res} = SQ_{Res} / (I(J - 1)) \quad \text{Equação 15}$$

Para testar a hipótese  $H_0$ , utiliza-se o teste F apresentado na tabela da Análise de Variância. Convém lembrar que esse teste é válido se os pressupostos assumidos para os erros do modelo estiverem satisfeitos.

Pode-se mostrar que o quociente QMTrat/QMRes tem distribuição F com  $(I - 1)$  e  $I.(J-1)$  graus de liberdade, supondo que,  $y_{ij}$  são variáveis aleatórias independentes, todos os tratamentos têm variâncias iguais a  $\sigma^2$  e  $Y_{ij} \sim N(\mu_i, \sigma^2)$ . Por esses motivos, os pressupostos da ANOVA devem ser testados ou avaliados em qualquer análise (LIMA, 2009).

Se  $F_{calculado} > F_{tabelado}$ , rejeitamos a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de variáveis independentes, ao nível  $\alpha$  de significância escolhido. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, não há evidências da diferença significativa entre as variáveis independentes, ao nível  $\alpha$  de significância escolhido.

Outra maneira de avaliar a significância da estatística F é utilizando o p-valor. Se o  $p\text{-valor} < \alpha$ , rejeitamos a hipótese de nulidade  $H_0$ . Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos, ao nível  $\alpha$  de significância escolhido.

### 3.1.4.1.1 Análise dos Efeitos através do Diagrama Pareto

Segundo Ramm (2007), o Gráfico de Pareto é outra maneira bastante usual na avaliação da significância estatística para efeitos de fatores manipulados durante um processo experimental. O Gráfico 02 mostra um exemplo para este tipo de gráfico.

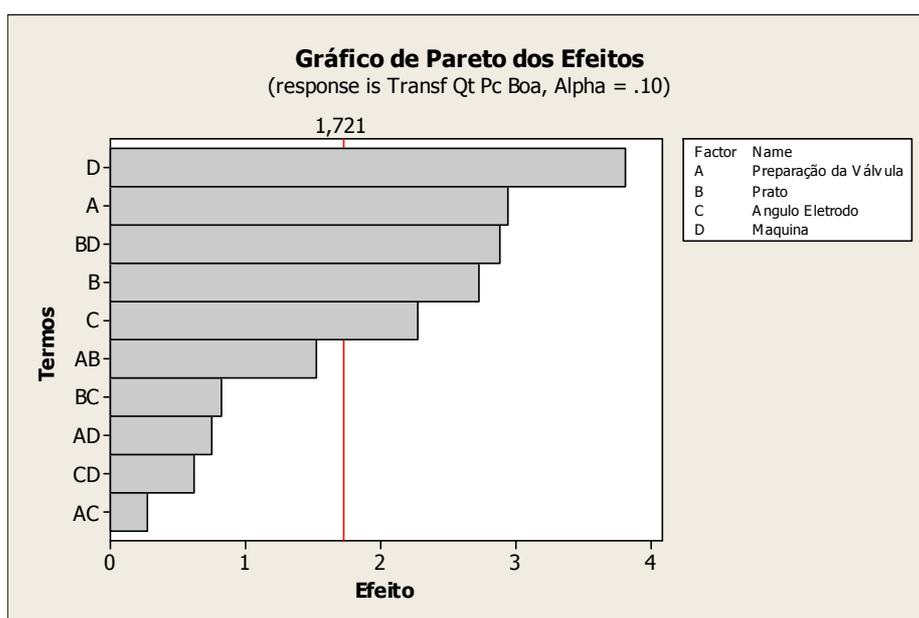


Gráfico 02: Exemplo de um diagrama de Pareto

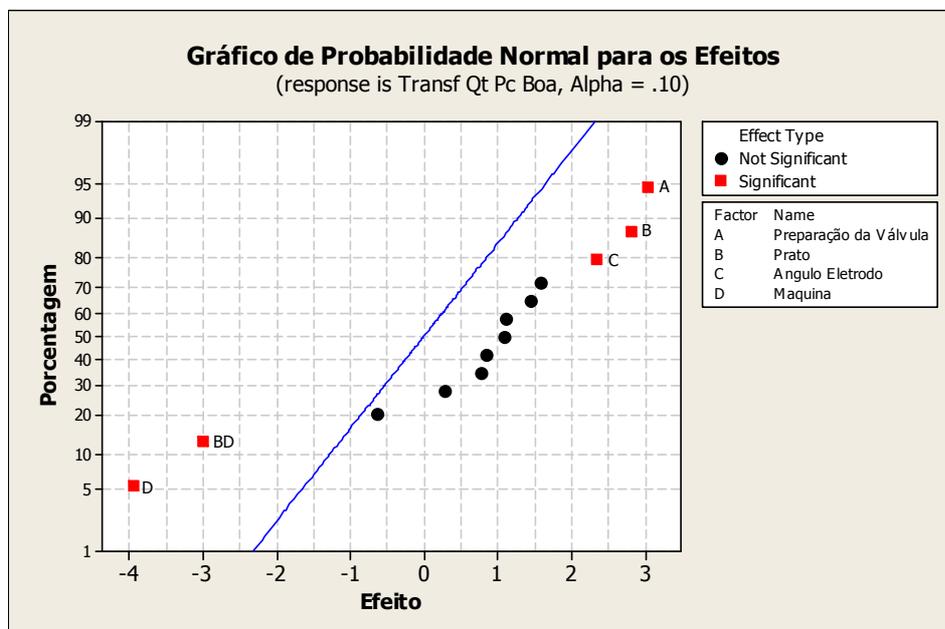
O gráfico de Pareto possibilita a visualização tanto da magnitude quanto da importância dos efeitos. Mostra o valor absoluto dos efeitos e possui uma linha de referência – linha vermelha do gráfico 02. Qualquer efeito que passe por esta linha é dito como significativo.

Tanto para o diagrama de Pareto quanto para o gráfico de probabilidade normal, quando não há graus de liberdade para o erro experimental, uma maneira de se identificar efeitos significativos é o Método de Lenth.

Em alguns casos, os graus de liberdade para o erro podem ser estimados via alguma técnica experimental, como replicação, por exemplo. Desta forma, a própria diferença entre os mesmos tratamentos replicados é tida como quantificadora do ruído experimental.

### 3.1.4.1.2 Análise dos Efeitos através do Gráfico de Probabilidade Normal

Segundo Ramm (2007), o gráfico de probabilidade normal dos efeitos também é muito utilizado na avaliação da significância estatística para efeitos de fatores manipulados durante um processo. O gráfico 03 mostra um exemplo para este tipo de gráfico.



**Gráfico 03:** Exemplo de um gráfico de probabilidade normal

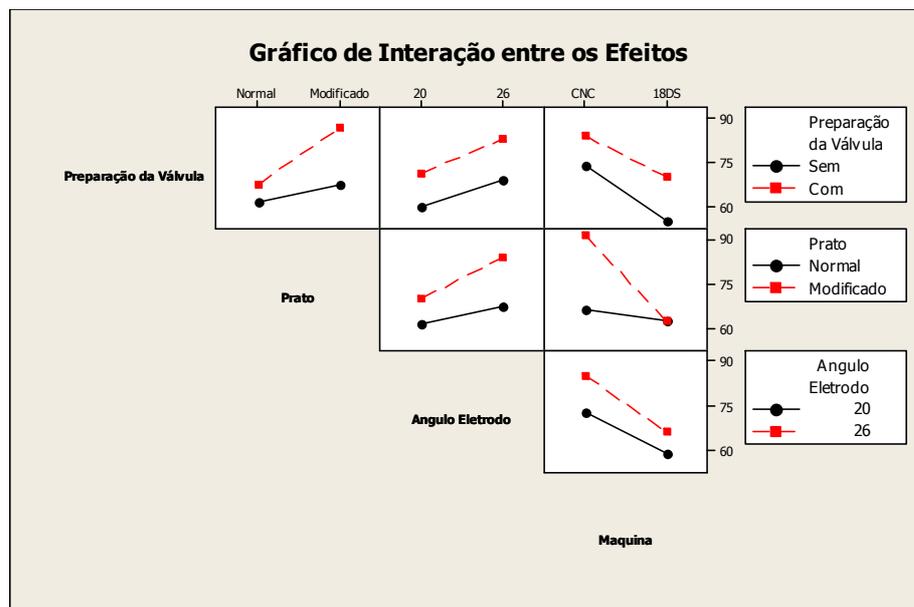
Pontos que não se encontram próximos aos limites da linha azul geralmente representam efeitos com dada significância estatística, sendo que, quanto mais

longe desta linha, maior será o valor do efeito do fator comparado com o ruído do experimento. Para a avaliação deste tipo de análise estatística vale lembrar que o erro experimental (ruído) deve ser normalmente distribuído com média nula e variância constante.

### 3.1.4.1.3 Análise dos Efeitos através do Gráfico de Interações

Segundo Ramm (2007), a interação entre os fatores é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator. Ou seja, o efeito de um fator depende da configuração dos níveis de outro fator.

O gráfico de interações dos efeitos (gráfico 04) representa interações de segunda ordem para um determinado par de efeitos, cada qual relacionado a um fator distinto. Em suma, quando ocorre uma significativa interação de segunda ordem entre dois fatores, o efeito de um dos fatores varia com a configuração dos níveis do outro fator.



**Gráfico 04:** Exemplo de um gráfico de Interação entre os Efeitos

Uma interação entre os fatores acontece quando a mudança da variável de resposta do menor nível ao maior nível estudado não é a mesma quando comparado a resposta de outros dois níveis de um segundo fator.

Graficamente significa que há uma intersecção das retas dos fatores que interagem entre si para os níveis estudados, enquanto para os efeitos que não interagem entre si, as retas se mantêm paralelas.

### 3.1.5 Fase de Controle

Controlar é a quinta fase de um projeto Seis Sigma. A fase de controle serve para que as melhorias realizadas sobre o processo ou produto sejam consolidadas e para checar a performance do processo ao longo do tempo (ECKES, 2003). É nesta fase que os membros do time transferem o projeto para o “dono” do processo .

Segundo Rotandaro (2002) qualquer sistema fechado tende da ordem para a desordem e para uma condição de mínima energia, ou seja, se nosso processo não estiver sob controle, tende a ficar mais “bagunçado” no futuro e, portanto, a capacidade tende a voltar para os níveis do início do projeto Seis Sigma.

Segundo Stamatis (2004), para que a fase de controle seja efetiva, alguns fatores devem ser identificados e endereçados. Os mais críticos são: elaboração de um sistema a prova de erros, planejamento de análise do sistema de medição, implementação do controle estatístico do processo, elaboração de um plano de reação e revisão do procedimento padrão operacional do processo.

A figura 21 mostra esquematicamente as ferramentas que podem ser utilizadas, algumas questões de revisão e as saídas que devem ser apresentadas ao final da fase de controle de um projeto Seis Sigma, dentre as quais se destacam o plano de controle, gerenciamento visual, procedimentos e instruções de trabalho, capacidade do processo e os gráficos de controle.

É na fase de controle em que a equipe deve definir como serão feitos esses controles e passar esta informação para os donos do processo, isto é, aqueles que trabalham no processo no dia-a-dia.

Nesta fase, deve ser estabelecido e validado um sistema de medição e controle para monitorar continuamente o processo, de modo a garantir que sua capacidade seja mantida.

O monitoramento das variáveis de entrada críticas é fundamental não só para manter a capacidade do processo estabelecida, mas também para indicar melhorias futuras. As saídas do processo devem ser controladas para garantir que os resultados surjam conforme o planejado.

Na fase de controle busca-se manter o processo aprimorado com um desempenho adequado e previsível, ou seja, não se quer que as melhorias obtidas na fase anterior retrocedam.

Detectar uma mudança no comportamento do processo, o mais rápido possível, pode fazer com que as ações corretivas adequadas sejam disparadas, e o processo, corrigido a tempo de evitar surpresas.

Ao final da fase de controle, o dono do processo será capaz de entender as principais entradas do processo e o impacto das mesmas sobre as saídas e qual ação corretiva a ser tomada se o nível de qualidade do processo reduzir abaixo do esperado.

### **3.1.5.1 Gráficos de Controle**

Segundo Reis (2001), o Controle Estatístico de Processos (CEP) envolve basicamente o desenvolvimento e interpretação dos resultados de Gráficos de Controle de processos e a utilização de técnicas para identificação de causas de problemas e oportunidades de melhoria da Qualidade.

Os objetivos destas técnicas poderiam ser resumidos em: “auxiliar na obtenção dos padrões especificados de qualidade e reduzir a variabilidade em torno destes padrões especificados”.

O CEP justifica-se pela existência e pela necessidade de avaliar a Variabilidade (para obter, manter ou melhorar o nível da Qualidade). Sempre que houver uma série de observações ou medidas obtidas de um processo tais medidas não serão idênticas entre si. Haverá uma variação, produzindo um padrão flutuante: Nenhum processo por maior que seja a sua “Qualidade” poderá extinguir totalmente esta variabilidade (REIS, 2001).

Atualmente as cartas de controle são amplamente utilizadas como ferramentas para mostrar o comportamento de determinadas operações de processo e sua variação ao longo do tempo, permitindo o monitoramento de variações devido a causas comuns e a identificação de variações decorrentes de causas especiais que geralmente afetam de forma negativa o processo (RAMM, 2007).

É inserido neste contexto que as cartas de controle foram desenvolvidas com o propósito de monitorar continuamente um dado processo e verificar se o mesmo está sob controle estatístico.

Para a utilização das cartas de controle, usualmente deve-se partir de alguns pressupostos como a suposição de que as variáveis apresentam distribuição normal (ou aproximadamente normal) e são independentes e identicamente distribuídas, ou

seja, não há relação entre os resultados obtidos ao longo do tempo e estes se apresentam igualmente distribuídos ao redor de um valor médio.

Segundo Ramm (2007), os aspectos mais importantes no monitoramento de um processo produtivo são: nível (medida de posição) e a dispersão. Mudanças significativas no nível ou na dispersão do processo produtivo podem indicar alterações significativas na característica de qualidade, e por este motivo estas duas características devem ser controladas simultaneamente. Baseados nestes aspectos, as cartas de controle são usualmente formadas por dois componentes, sendo que a carta para a dispersão monitora a variabilidade dentro da amostra (variação “*within*”), enquanto que os gráficos para o nível monitoram a variabilidade entre as amostras (variação “*between*”).

Os tipos mais comuns de cartas de controle para variáveis são (RAMM, 2007):

- Cartas  $\bar{X}$  e  $R$  (média e amplitude): utiliza as médias amostrais, e a variabilidade do processo é estimada por meio da amplitude. É de longe o tipo de carta de controle mais empregado devido à facilidade na elaboração dos cálculos, porém, o uso da amplitude indica com menor precisão a variabilidade do processo. É geralmente indicado para casos em que o subgrupo seja menor que seis;
- Cartas  $I$  e  $MR$  (valores individuais e amplitude móvel): quando o subgrupo  $n=1$  utiliza-se este tipo de carta. Sua principal aplicação é em situações onde a taxa de produção é muito baixa ou com pouca variabilidade, onde essa é medida por meio da amplitude entre dois valores consecutivos. A variação “*within*” é construída artificialmente.

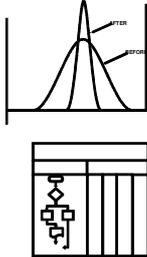
**Fase**

**Controlar**

- **Coloque controles apropriados nos principais (X's) do processo para manter a melhoria**
  - ★ Documento do Projeto
- **Prover evidências estatísticas de que a melhoria é sustentada. (3 meses de dados)**
  - ★ Feche o projeto Six Sigma
  - ★ Celebre o sucesso com o time!!!

**Ferramenta**

- Plano de Controle
- Gráfico de Controle
- Gerenciamento visual
- Procedimentos / Instruções de Trabalho
- Capabilidade do Processo
- MPT



**Questões para Revisão**

- 33. Especificamente, como podemos controlar as principais variáveis de entrada? Quais são os novos padrões, procedimentos de operação, controles visuais e qual é o plano de treinamento?
- 34. Qual sistema(s) de coleta de dados devemos implementar para controlar X e monitorar Y?
- 35. Os sistemas de medições são adequados?
- 36. Como é nosso novo nível de desempenho comparado com nossa meta? Somos capazes de manter este nível?
- 37. Nós alcançamos nossos objetivos financeiros?
- 38. Quais outras melhorias serão necessárias?
- 39. Como podemos aplicar o que aprendemos em outras áreas? Se apropriado, há um plano para desenvolver estas melhorias nestas outras áreas?
- 40. Quais são as implicações financeiras?
- 41. Existe algum outro projeto como este sendo desenvolvido?
- 42. Que lições você aprendeu, além do conhecimento do processo?
- 43. Seus ganhos foram aprovados e estão registrados pela controladoria?

**Saídas**

- Novo Procedimento de Operação e Controle nas Áreas.
- Novos Dados da Capabilidade do Processo
- Comparação do Novo Nível de Desempenho com a Meta.
- Projeto entregue ao Dono do Processo
- Documentação do Projeto
- Ganhos e outros Benefícios Validados (3 meses de dados)
- Oportunidade para Implementar as Melhorias em Outras Áreas (plano de desenvolvimento)

**Figura 21:** Ferramentas, questões para revisão e saídas da fase de controle.  
**Fonte:** Adaptado de STAMATIS (2004) e PYZEDEK (2003)

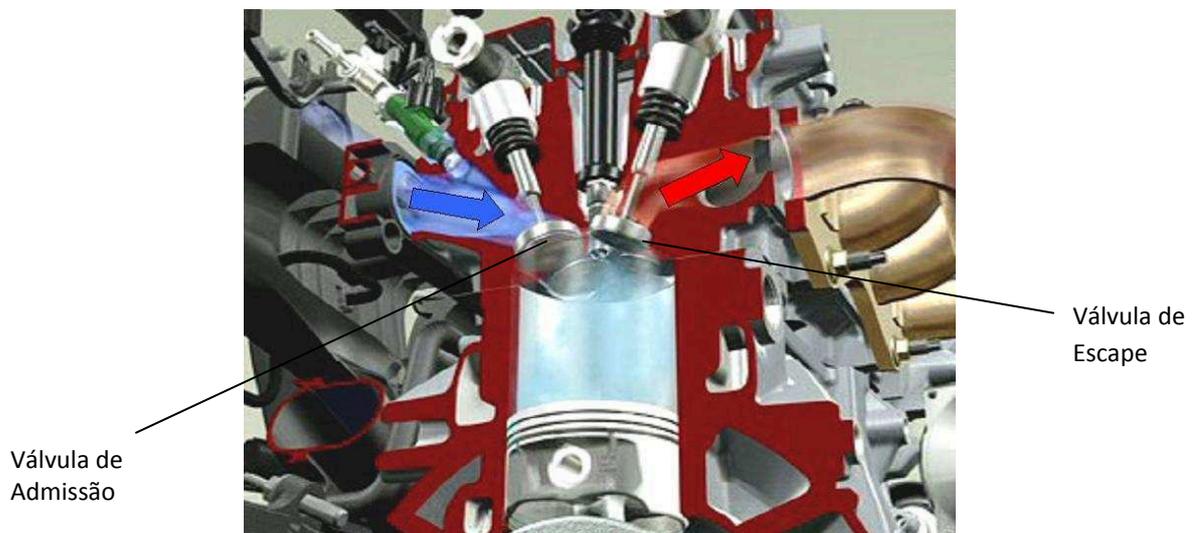
#### 4. Válvulas de Admissão e Escape

Conforme Martinelli (2000), as válvulas são os componentes responsáveis pelo controle da entrada e saída do fluxo de gases dos cilindros do motor e são classificadas como válvulas de admissão e válvulas de escape (figura 22) conforme suas funções dentro do motor.



**Figura 22:** Válvulas Automotivas

As válvulas de admissão controlam a entrada da mistura de ar e combustível para dentro do cilindro, no caso de motores ciclo Otto (gasolina, álcool e gás natural) ou ar no caso de motores ciclo Diesel e as válvulas de escape permitem a saída dos gases provenientes da combustão interna do motor (figura 23).



**Figura 23:** Válvula de Admissão e Escape no Motor

Ambas as válvulas são bastante solicitadas durante o funcionamento do motor, devendo atender as exigências quanto à resistência mecânica e às elevadas temperaturas de trabalho. Desta forma, os aços liga utilizados são especialmente desenvolvidos para atender aos requisitos técnicos de trabalho no motor e à fabricação das válvulas.

Os principais fatores que afetam a seleção dos materiais e as construções das válvulas são:

- A temperatura de trabalho (válvulas de escape podem trabalhar a temperaturas que variam de 700 °C até 850 °C);
- Níveis de esforços impostos sobre as válvulas;
- Ambiente corrosivo (proveniente dos gases de combustão).

Estes fatores são atribuídos aos aços através da adição de elementos de liga como cromo, níquel, molibdênio, silício, manganês, nitrogênio e pela realização de tratamentos térmicos adequados.

As dimensões das válvulas variam com o projeto de cada motor, principalmente em função da cilindrada do motor, do tipo de acionamento das válvulas e do projeto do cabeçote. No motor, as válvulas ficam alojadas no cabeçote e existem diversos mecanismos para ao acionamento das mesmas.

#### 4.1 Regiões da Válvula

As válvulas são divididas em 3 regiões (figura 24): cabeça, haste e ponta.

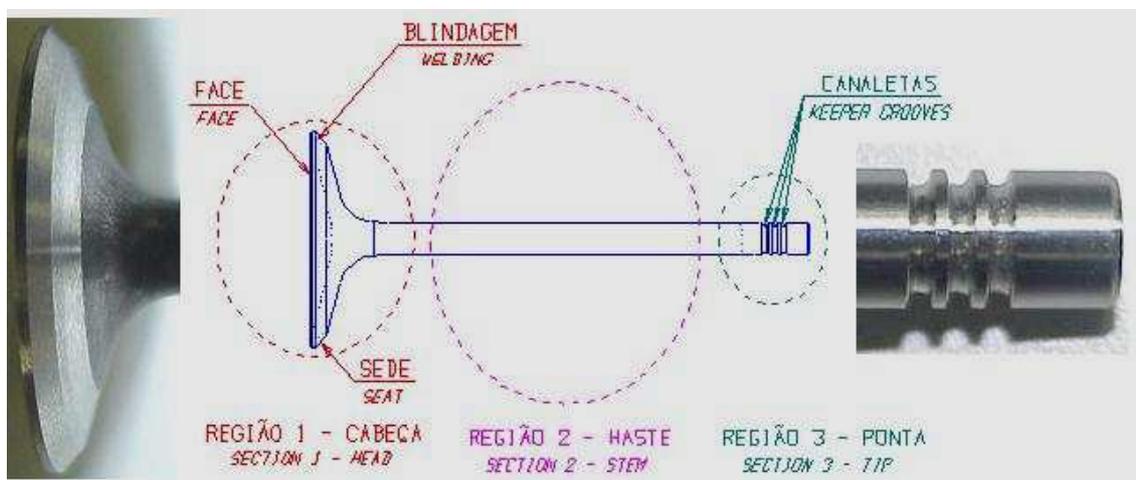


Figura 24: Regiões da Válvula

A cabeça tem a função de controlar o fluxo de gases que entram ou saem da câmara de combustão, sendo a sede o seu item de maior importância, pois qualquer impureza ou defeito pode ocasionar vazamento e conseqüentemente a perda de potência do motor.

A haste trabalha dentro da “Guia de Válvula”, que possui um espaço bastante estreito para trabalho, assim, o controle do diâmetro e da rugosidade (ambos em micron) deve ser considerado como item fundamental para não ocorrer travamento da peça no cabeçote do motor. O processo de eletrodeposição de cromo duro na haste das válvulas de admissão e escape se torna extremamente importante justamente pelo trabalho executado por esta região da válvula dentro do motor.

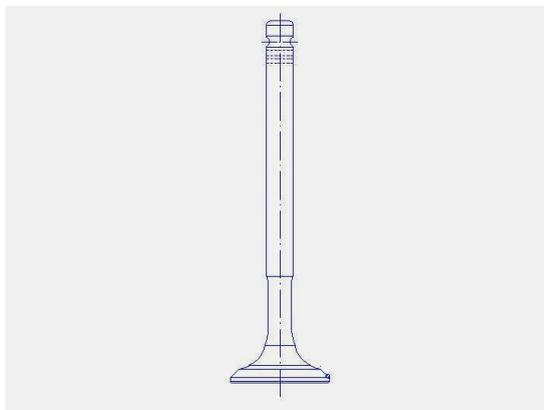
A ponta sofre um esforço muito grande durante os ciclos do motor, e é controlada em sua rugosidade e dureza para não haver desgaste nos outros componentes com quem irá entrar em contato, outro item importante é o controle das canaletas, em seu diâmetro e raio, para proporcionar uma montagem perfeita com os outros componentes de fixação.

## 4.2 Tipos de Construção de Válvulas

### 4.2.1 Válvulas Monometálicas

Válvulas monometálicas (figura 25) são constituídas por um único aço, normalmente aço inoxidável martensítico.

Válvulas de admissão são geralmente monometálicas por não apresentarem elevadas temperaturas de trabalho durante o funcionamento do motor.



**Figura 25:** Válvula Monometálica

#### 4.2.2 Válvulas Monometálicas com Blindagem na Sede

São válvulas em que o corpo é constituído por um único aço, que pode ser aço inoxidável martensítico ou aço inoxidável austenítico, porém na sede da válvula é soldada uma liga metálica para garantir maior resistência ao desgaste e a corrosão. Esse tipo de construção pode ser aplicado em válvulas de admissão (quase sempre para motores álcool ou flexíveis) e escape (figura 26).

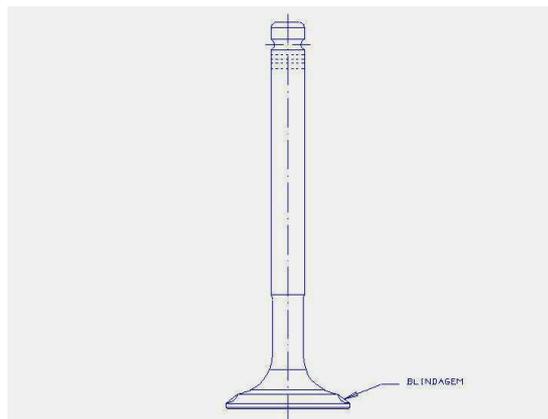


Figura 26: Válvula Monometálica com Blindagem na Sede

#### 4.2.3 Válvula Bimetálicas

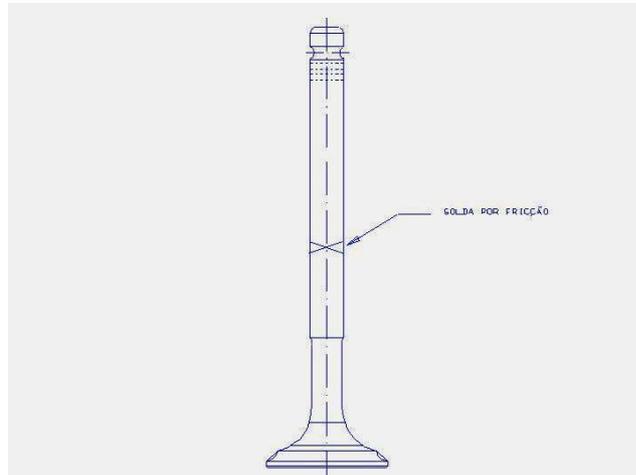
São válvulas constituídas por dois tipos de aços, onde normalmente a cabeça é de aço inoxidável austenítico e a haste de aço inoxidável martensítico ou aço baixa-liga para construção mecânica.

O material da cabeça possui propriedades que garantem boa resistência mecânica às elevadas temperaturas de trabalho e boa resistência à corrosão. Esse tipo de construção é empregado em válvula de admissão de motores ciclo Diesel (figura 27).

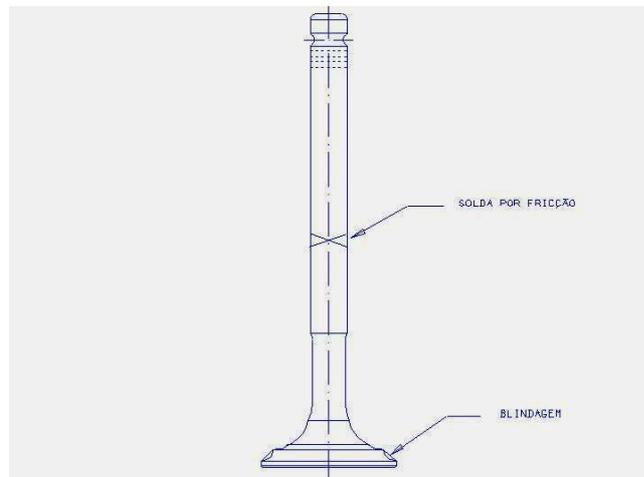
#### 4.2.4 Válvula Bimetálica com Blindagem na Sede

São válvulas construídas com dois materiais, onde normalmente a cabeça é de aço inoxidável austenítico e a haste de aço inoxidável martensítico ou aço baixa-liga para construção mecânica. O material da cabeça possui propriedades que garantem boa resistência à corrosão e resistência mecânica a elevadas temperaturas de trabalho. Na sede da válvula uma liga metálica refratária é soldada por Plasma para garantir boa resistência ao desgaste e à corrosão.

Este tipo de construção pode ser empregado em válvulas de escape e em válvulas de admissão de motores ciclo Diesel e Otto (álcool ou flexíveis), quando as mesmas são submetidas a condições extremamente severas de trabalho (figura 28).



**Figura 27:** Válvula Bimetálica



**Figura 28:** Válvula Bimetálica com Blindagem na Sede

## 5. Processo de Eletrodeposição de Cromo Duro

A galvanostegia, ou galvanoplastia, tal como se conhece hoje, inspira-se no trabalho do médico italiano Luigi Galvani (1737-1798). Galvani desenvolveu estudos aprofundados sobre a eletricidade e suas propriedades. Com base nos conhecimentos por ele divulgados, foi possível sistematizar o depósito de materiais sobre superfícies diversas, por meio de processos eletrolíticos (SINDIDUPER/ABTS, 2006).

Atualmente, o cromo é um metal largamente utilizado, sendo um dos poucos metais que pode ser depositado eletroliticamente, com alta dureza, a partir de eletrólitos aquosos. Seu aspecto visual é branco-cinza, passível de polimento, assumindo uma coloração azulada (SINDIDUPER/ABTS, 2006).

O cromo é um metal não-nobre, apresenta um potencial de equilíbrio padrão relativamente baixo ( $E^0_{Cr^{+3}/Cr} = -0,74 \text{ V}$ ), que deveria se comportar como ferro quanto às reações corrosivas. Mas na prática o metal se comporta antes como um metal nobre, porque o cromo se passiva superficialmente em meios poucos oxidantes, tornando-se assim, muito nobre e conseqüentemente o metal quase não sofre alteração química (PANOSSIAN, 1997; WEINER, 1973).

Este metal é extremamente ativo por esse motivo recobre-se de óxido muito rapidamente. O óxido deste metal, entretanto, é excepcionalmente resistente à corrosão, o que faz cessar a reação de oxidação quando a película de óxido é formada (MORILLAS, 2005).

Em meio isento de oxigênio, uma peça cromada poderá ter seu revestimento rapidamente destruído se, por algum meio mecânico, for removida a película superficial de óxido. Sem a presença de oxigênio, não há reação de formação da película de óxido de cromo comprometendo sua propriedade de proteção contra corrosão (MORILLAS, 2005).

O cromo praticamente só é atacado pelo ácido clorídrico e pelo ácido sulfúrico a quente e é bastante resistente a condição atmosférica e ao embaçamento. O cromo apresenta excelente resistência à corrosão, ao desgaste, baixo coeficiente de fricção e possui dificuldade para se molhar, isto é, repeli óleos e meios aquosos. Devido a estas características, o cromo tem sido largamente utilizado para revestir metais como, por exemplo, o aço, com o objetivo de conferir à superfície dos mesmos as suas propriedades (PANOSSIAN, 1997; WEINER, 1973).

As duas principais classes de deposição de cromo são o Decorativo e o Cromo Duro (CPMA, 2001). Os dois processos de cromo, tanto o decorativo como o duro, apresentam baixo rendimento, entre 10 a 20% (FISHBIEN, 1981).

Esse baixo rendimento do processo deve-se ao fato de que 80 a 90% da corrente elétrica é utilizada na eletrólise da água, contida na solução aquosa do banho eletrolítico, liberando H<sub>2</sub> através do cátodo e O<sub>2</sub> através do ânodo (SILVA, 2001).

Tem-se o cromo decorativo quando um fino depósito de cromo (0,25 a 0,75 mm) é aplicado sobre uma camada de níquel ou cobre-níquel. Isso confere um visual com um brilho duradouro à peça que sofreu o depósito. Do ponto de resistência à abrasão, o metal também proporciona um acabamento durável, como o visto em bicicletas, motos, ferramentas, instrumentos cirúrgicos (CPMA, 2001).

Depósitos de cromo duro (também chamado cromo industrial ou de engenharia) envolvem a deposição de uma camada grossa de cromo diretamente sobre o substrato. O depósito de cromo duro confere à peça uma combinação de propriedades físicas e mecânicas, como maior dureza (800 a 1000 Vickers, normalmente), resistência à abrasão, baixo coeficiente de fricção, boa resistência à corrosão, alta resistência ao calor (maior que 400 °C) e não adesividade (CPMA, 2001).

A espessura usual do cromo duro varia de 2,5 a 300 mm. Em geral, um depósito de 125 mm de espessura é considerado adequado para a maioria das aplicações. O cromo duro é aplicado a vários componentes na maioria das indústrias, por exemplo: indústria de medidores, ferramentas de corte, anéis, cilindros, eixos, rolamentos e na indústria de impressão e de auto-peças. Uma das aplicações mais importantes do cromo duro é na recuperação de peças mal acabadas ou com defeitos de fabricação (CPMA, 2001).

As principais propriedades do cromo duro são a resistência ao desgaste, resistência a corrosão e resistência ao risco, sendo esta última a mais importante para o trabalho exercido pela haste das válvulas de admissão e escape dentro do motor.

Referente à resistência ao desgaste, Silman (1995) diz que os valores de dureza obtidos estão entre 850 e 1200 Vickers, equivalente a 70 Rockwell C ou 800

Brinell. A dureza do revestimento varia de acordo com as condições do banho eletrolítico para deposição e da estrutura cristalina.

O cromo é resistente à corrosão pela formação de uma camada de óxido estável, atuando como barreira. Por sua pouca reatividade com os produtos oxidantes ou redutores, o cromo resiste a maior parte de ácidos e alcalinos, bem como à oxidação a altas temperaturas (MORILLAS, 2005).

O cromo duro também apresenta alta resistência ao risco. Esta propriedade está mais ligada com o aspecto da dureza do cromo. O cromo precipitado por meios eletrolíticos tem uma dureza extraordinária, muito maior que a do ferro. Devido a esta dureza extraordinária do cromo ele é usado para proteger todas as superfícies metálicas submetidas ao desgaste e que devem ser protegidas contra o esfregamento (BUZZONI, 1991).

A eletrodeposição constitui-se o principal método de aplicação do cromo. Os revestimentos de cromo são obtidos a partir de banhos eletroquímicos contendo ácido crômico e catalisadores, sendo usual a utilização de ácido sulfúrico. Também pode ser utilizado o ácido fluorsilícico ou fluorbórico. O banho geralmente contém 250 g/L a 400 g/L de ácido crômico e 2,5 g/L a 4,0 g/L de ácido sulfúrico, sendo a razão  $\text{CrO}_3:\text{SO}_4^{2-}$  um parâmetro de suma importância para o adequado desempenho do banho (PANOSSIAN, 1997).

Compostos orgânicos são instáveis no banho do cromo que é altamente oxidante. Assim torna-se praticamente impossível modificar a estrutura e as propriedades dos depósitos através de aditivos abrillantadores e/ou niveladores, como são feitos na eletrodeposição de outros metais. Variações nas concentrações do ácido crômico ou dos catalisadores e utilização de catalisadores diferentes constituem as únicas alterações de formulação possíveis, capazes de determinar modificações nas características dos depósitos. Além da composição do banho, condições de operação, como densidade de corrente, tempo, temperatura, influenciam nas características dos revestimentos (PANOSSIAN, 1997).

Ânions estranhos têm grande influência na deposição do cromo, principalmente o sulfato encontrado no ácido crômico comercial, o qual não pode ultrapassar certa quantidade na relação de ácido crômico para íon sulfato. Logo, é indispensável utilizar um ácido crômico isento de ânions estranhos bem como conhecer e levar em conta o teor destes, que deve ser baixo no ácido crômico.

Geralmente admite-se um teor máximo de ânions no ácido crômico de 0,2 % de íon sulfato (WEINER, 1973).

As concentrações do ácido crômico e ácido sulfúrico no banho são de importância secundária com relação ao fator principal, que é a relação de ácido crômico e ácido sulfúrico, que precisa ser mantida em torno de 100:1 (SILMAN, 1955).

As propriedades de uma camada de cromo, porém, não dependem unicamente da concentração de ácido crômico no eletrólito. Dependem, sobretudo, de catalisadores e das condições de trabalho da eletrólise, como por exemplo, densidade de corrente, temperatura e tempo deposição (WEINER, 1973; PANOSSIAN, 1997).

A tabela 03 mostra as etapas, concentrações, temperaturas e tempos necessários para a aplicação de cromo duro sobre o aço.

**Tabela 03:** Etapas, concentrações, temperaturas e tempos para aplicação do cromo duro sobre o aço

<b>Etapa</b>	<b>Concentração</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo</b>
1. Desengraxante Químico	50 - 75 g/L	65 - 100 °C	2 - 15 min.
2. Desengraxante Eletrolítico	40 - 90 g/L	60 - 70 °C	1 - 5 min.
3. Lavagem Dupla	–	Ambiente	–
4. Ativação Ácida	5 % v/v	Ambiente	15 - 30 seg.
5. Lavagem Dupla	–	Ambiente	–
6. Ataque Anódico	120 g/L 1,2 g/L	55 - 60 °C	30 seg. - 1 min.
7. Cromo Duro	170 mL/L 2,4 g/L 5,6 g/L	50 - 65 °C	1 µm/h (60 A/ dm <sup>2</sup> )
8. Água de Recuperação (Cr)	–	Ambiente	–
9. Lavagem Dupla	–	Ambiente	–
10. Secagem	–	60 °C	–

**Fonte:** Adaptado de SURTEC (2006)

## 5.1 Tipos Falhas e Defeitos Gerados no Processo de Eletrodeposição de Cromo Duro

Surtec (2006) descreve cinco problemas que podem ocorrer em peças que sofrem o processo de eletrodeposição de cromo duro, são eles:

- Queima nas áreas de alta densidade de corrente;
- Penetração menor que 70%;
- Manchas iridescentes com tonalidade marrom;
- Manchas cinza;
- Nuvens brancas.

A tabela 04 mostra de forma detalhada as possíveis causas e as correções para os problemas mencionados pelo manual técnico SurTec (2006).

**Tabela 04:** Tabela dos Problemas, Possíveis Causas e Correções

Problema	Possível Causa	Correções
Queima nas áreas de alta densidade de corrente.	Teor baixo do ácido crômico. Temperatura baixa.	Aumentar o teor de ácido crômico para 200 a 250 g/l.
Penetração menor que 70%.	Temperatura maior que 40°C. Teor de sulfato alto.	Abaixar a temperatura. Para a precipitação do sulfato, adicionar 0,4 g/l de carbonato de bário e fazer um novo teste, repetir se for necessário.
Manchas iridescentes com tonalidade marrom.	Teor de sulfato baixo.	Adicionar 0,1 a 0,5 ml/l de ácido sulfúrico e fazer um novo teste, repetir se for necessário.
Manchas cinzas.	Temperatura baixa.	Aumentar a temperatura para 30-40 °C.
	Teor baixo de fluoreto.	Adicionar o Cromo e fazer um novo teste, repetir se for necessário.
Nuvens brancas.	Presença de cloreto.	Precipitar com óxido ou carbonato de prata conforme análise do cloreto.

**Fonte:** Adaptado de SURTEC (2006)

Segundo Zaki (2009), os problemas mais comuns apresentados em peças que passaram pelo processo de eletrodeposição de cromo são:

- Depósito de cromo com aspecto leitoso;
- Depósito de cromo com aspecto opaco;
- Depósito de cromo com aspecto cinza e sem brilho;
- Depósito de cromo com aspecto azul;
- Depósito de cromo com aspecto poroso;
- Depósito de cromo com aspecto queimado;

- Depósito de cromo com mancha marrom ou colorida;
- Depósito de cromo sem aderência;
- Depósito de cromo com pouca cobertura;
- Não deposição de cromo;
- Depósito de cromo com furos.

A tabela 05 mostra de forma detalhada as possíveis causas para os problemas mencionados no item 5.1.

SEBRAE – MG (2005), indica três tipos de defeitos que podem ocorrer nas peças durante a eletrodeposição de cromo duro e suas possíveis causas. São eles:

- Queima nas regiões de alta densidade de corrente. Possíveis causas:
  - Temperatura muito baixa;
  - Concentração muito baixa;
  - Distância entre anodo e catodo pequena;
  - Anodos de comprimento inadequado ou mal distribuídos;
  - Densidade de corrente muito alta;
- Falsa Queima. Possíveis causas:
  - Duplo contato;
  - Bipolaridade na saída do níquel ou na entrada do cromo;
  - Níquel passivo.
- Baixa Penetração:
  - Concentração muito baixa;
  - Relação  $\text{CrO}_3$  : Catalizador inadequado;
  - Densidade de corrente muito baixa;
  - Temperatura muito alta;
  - Níquel passivo.

**Tabela 05:** Tabela dos Problemas e Possíveis Causas

<b>Problema</b>	<b>Possível Causa</b>
Depósito de cromo com aspecto leitoso	Alta relação ácido crômico/ácido sulfúrico Contaminação com cloretos Contaminação com Ferro Excesso de cromo trivalente Alta temperatura
Depósito de cromo com aspecto opaco	Alta relação ácido crômico/ácido sulfúrico Contaminação de cloretos Contaminação com Ferro Excesso de cromo trivalente Baixa temperatura Densidade da corrente muito alta Fluxo de corrente intermitente
Depósito de cromo com aspecto cinza e sem brilho	Alta relação ácido crômico/ácido sulfúrico Pico de corrente durante o contato Alta temperatura
Depósito de cromo com aspecto azul	Alta temperatura
Depósito de cromo com aspecto poroso	Baixa concentração de sulfato Baixa temperatura Preparação da superfície Partículas suspensas no banho
Depósito de cromo com aspecto queimado	Alta relação ácido crômico/ácido sulfúrico Baixa concentração de ácido crômico Excesso de cromo trivalente Densidade da corrente muito alta Baixa temperatura
Depósito de cromo com mancha marrom ou colorida	Baixa concentração de sulfato ou catalisador Contatos ineficientes
Depósito de cromo sem aderência	Decapagem insuficiente Superfície contaminada Contato intermitente
Depósito de cromo com pouca cobertura	Baixa concentração de ácido crômico Baixa relação ácido crômico/ácido sulfúrico Baixa corrente no banho de cromo Contatos oxidados Anodos danificados Alta temperatura
Não deposição de cromo	Polaridade reversa Defeito nos contatos Excesso de sulfato Contaminação com cloretos
Depósito de cromo com furos	Furos no material base Superfície contaminada com partículas de ferro Formação de gases

**Fonte:** Adaptado de Zaki (2000 e 2003)

## **6. Metodologia da Pesquisa**

Segundo Silva e Menezes (2001), pesquisar significa, de forma bem simples, procurar respostas para indagações propostas.

Demo (1996) insere a pesquisa como atividade cotidiana considerando-a como uma atitude, um “questionamento sistemático crítico e criativo, mais a intervenção competente na realidade, ou o diálogo crítico permanente com a realidade em sentido teórico e prático”.

Para Gil (1999), a pesquisa tem um caráter pragmático, é um “processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos”.

Pesquisa é um conjunto de ações, propostas para encontrar a solução para um problema, que têm por base procedimentos racionais e sistemáticos. A pesquisa é realizada quando se tem um problema e não se tem informações para solucioná-lo (SILVA e MENEZES, 2001).

Pelo fato do autor estar envolvido de modo participativo do estudo de caso em questão, esta pesquisa pode ser definida como pesquisa-ação.

Este processo de pesquisar reúne o pensamento e a ação de uma ou mais pessoas, no esforço da elaboração de conhecimentos sobre aspectos da realidade que deverão ser úteis para a formulação de propostas e soluções aos problemas envolvidos na pesquisa. Desta forma, enquanto uma atividade humana e social, a pesquisa, inevitavelmente, carrega consigo valores, preferências, interesses e princípios que orientam o pesquisador; o que elimina a chance do pesquisador de se abrigar em uma posição de neutralidade científica o que, por outro lado, não significa ausência do rigor que o trabalho científico deve possuir (MAGALHÃES, 2008).

Neste sentido, segundo Thiollent (2007), a pesquisa-ação, além da participação proposta pela pesquisa participante, supõe uma forma de ação planejada de caráter social, educacional, técnico ou outro, os pesquisadores buscam desempenhar um papel ativo na própria realidade dos fatos observados.

Assim, na pesquisa-ação os pesquisadores desempenham um papel ativo no equacionamento dos problemas encontrados, no acompanhamento e na avaliação das ações desencadeadas em função dos problemas (THIOLLENT, 2007).

Uma das especificidades da pesquisa-ação consiste na relação de dois importantes objetivos: o objetivo prático de contribuir para o equacionamento possível do problema central na pesquisa, enquanto um levantamento de soluções e propostas de ações que possam contribuir com os agentes na atividade transformadora da situação e; o objetivo de conhecimento, que visa obter informações que seriam de difícil acesso por meio de outros procedimentos (THIOLLENT, 2007).

Neste tipo de pesquisa, além de ser constituída pela ação e pela participação, é necessário produzir conhecimentos, adquirir experiência, contribuir para a discussão da área estudada ou fazer avançar o debate acerca das questões abordadas (VERGARA, 2005).

Em função da sua orientação prática, a pesquisa-ação é voltada para diversas aplicações em diferentes áreas de atuação, sem que com isto se reduza a necessidade de uma constante reflexão teórica. Na constante reconstrução, para além de apenas observar ou de descrever, o principal aspecto é projetivo e remete à criação ou planejamento. O problema consiste em saber como alcançar determinados objetivos, produzir determinados efeitos, conceber objetivos, organizações, práticas educacionais com critérios e características aceitos pelos grupos interessados. O formato de raciocínio projetivo no desenvolvimento deste tipo de pesquisa difere-se das formas de raciocínio explicativo, que se dá nas formas de pesquisa que buscam apenas a observação dos fatos (MAGALHÃES, 2008).

Para Bartilotti (2007), a natureza da variável pesquisada pode ser classificada como quantitativa ou qualitativa. A pesquisa quantitativa baseia-se, a princípio, no pressuposto de que a teoria pode ou não ser verificada. Procura medir o grau de algo que está presente. A pesquisa qualitativa busca uma explicação, a partir do mundo real. Atua mediante um embasamento teórico. É capaz de identificar a presença ou ausência de algo. Apesar das orientações filosóficas serem diferenciadas, é possível o desenvolvimento de uma pesquisa que contemple ambas as metodologias, indicando o modo pelo qual as pessoas pensam sobre a natureza do mundo e explicitando também o grau de importância de uma variável independente com relação à outra dependente.

Existem vários tipos de pesquisa, cada um dos quais tem fundamentos, procedimentos e características próprias. O interesse do homem pelo saber o leva a

investigar a realidade sob os mais diversos aspectos e dimensões, através de diferentes níveis de aprofundamento e enfoques específicos, de acordo com o objeto do estudo (MAGALHÃES, 2008).

Na pesquisa-ação em questão focaremos os dados quantitativos e qualitativos. Caracteriza-se também por ser exploratória, devido ao pouco conhecimento que se tem sobre o problema estudado.

## **6.1 Descrição da Empresa**

A empresa onde o estudo de caso foi realizado faz parte de um grupo multinacional de origem norte-americana com sede em Ohio, EUA e conta com um faturamento anual de cerca de US\$ 10 bilhões, empregando mais de 55 mil pessoas nos mais de 50 países onde suas 195 plantas estão instaladas.

Com capacidade de produção de 30 milhões de peças por ano, esta empresa conta hoje com um time de 580 colaboradores, produzindo e comercializando válvulas para motores no mercado original e de reposição interno e externo.

É uma empresa que está sempre se atualizando e investindo em treinamento de pessoal, tecnologia de processo e produto para sempre ir de encontro às expectativas de seus clientes, antecipando-se e acompanhando as tendências da indústria automobilística na era da globalização. Por três anos consecutivos foi congratulada pela revista "EXAME" e "Você S/A", dentre as 150 melhores empresas para se trabalhar no Brasil (2004, 2005 e 2006) e ainda pela revista "ÉPOCA" em 2006 como uma das 100 melhores empresas para se trabalhar no Brasil.

## **6.2 Detalhamento do Processo Estudado**

O processo de eletrodeposição de cromo duro estudado é realizado em um equipamento onde a limpeza (lavagem com água e desengraxante) das peças e a eletrodeposição de cromo são automáticas e o carregamento e descarregamento das peças no equipamento é realizado manualmente.

Este processo é composto por sete sub-processos, sendo eles: carregamento das peças, desengraxe, primeira lavagem com água, ativação do cromo (pré-cromo), deposição de cromo, segunda lavagem com água e descarregamento das peças.

### 6.2.1 Carregamento e Descarregamento das Peças no Equipamento

As peças são carregadas em gancheiras e o processo de carregamento e descarregamento das válvulas de admissão e escape no equipamento é feito de forma manual (figura 29). O operador é responsável em receber as peças, carregar o equipamento com as peças não cromadas e descarregar as peças cromadas nas respectivas embalagens.



**Figura 29:** Carregamento e Descarregamento do Equipamento

### 6.2.2 Desengraxante, Lavagem com Água e Ativação do Cromo

A função do banho de desengraxante é remover todos os óleos e graxas das peças, oriundo dos processos de usinagem e de proteção das peças anteriores ao processo de eletrodeposição de cromo duro.

A lavagem com água é realizada para remover todo elemento desengraxante carregado pela peça para que aja a correta ativação do cromo e conseqüentemente a correta deposição de cromo sobre a peça.

A ativação do cromo se faz necessária, afim de garantir o início do processo de deposição de cromo, através da eliminação de filmes de óxidos metálicos que recobrem a superfície.

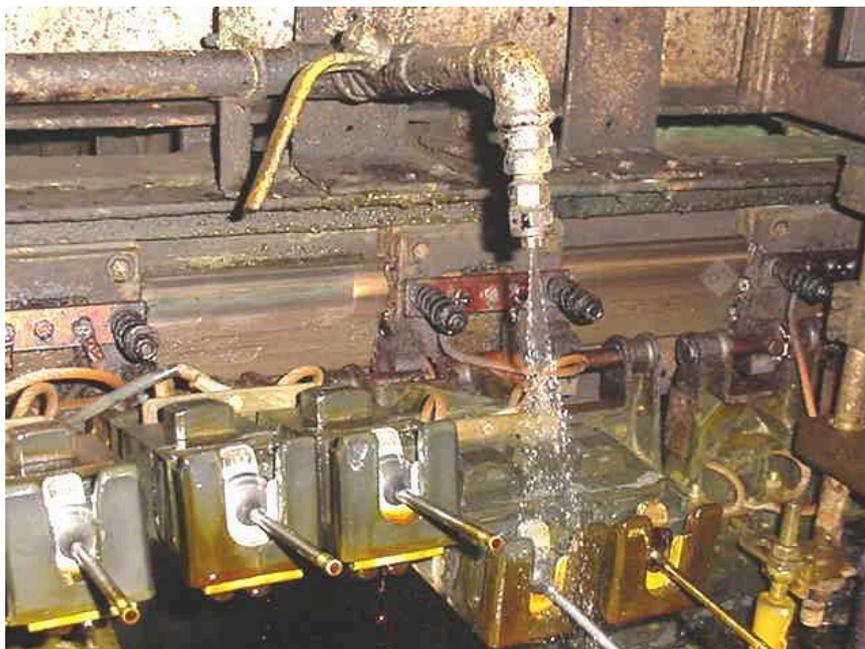
### 6.2.3 Deposição de Cromo

A peça é fixada no pólo negativo catodo, onde ocorre a deposição do cromo metálico. No pólo positivo fixamos os anodos, onde ocorre a reconstituição do ácido

crômico. Os anodos, devido ao baixo poder de penetração e a grande variação das características físicas do depósito com a densidade da corrente, devem acompanhar a geometria da superfície a ser cromada de modo que a distância até a peça seja sempre constante para garantir a uniformidade da deposição. O processo de deposição inicia-se quando, mediante a passagem de corrente contínua promove-se a eletrólise da solução.

#### 6.2.4 Lavagem com Água

Esta segunda lavagem com água (figura 30) tem o objetivo de remover o excesso de ácido crômico carregado junto à válvula. Após a lavagem as peças cromadas são descarregadas manualmente do equipamento.



**Figura 30:** Lavagem das válvulas cromadas

#### 6.3 Roteiro para Obtenção dos Dados

Visando a resolução do problema seguiu-se a seguintes etapas:

1. Definição da linha de base: definiu-se a linha de base através da coleta dos dados de retrabalho dos defeitos de mancha e queima na face referente ao período de janeiro a junho de 2007. Visto a quantidade significativa de peças retrabalhadas neste período, decidiu-se dar continuidade ao trabalho.

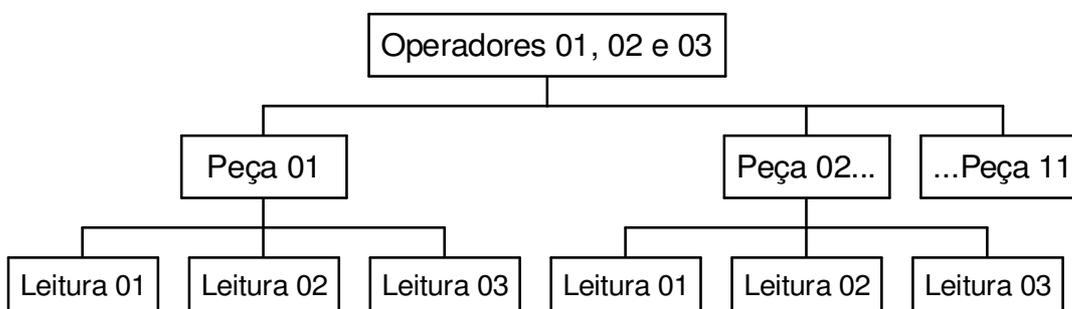
2. Formação do time de trabalho: o time de trabalho foi formado por um especialista na metodologia Seis Sigma, um especialista no processo de eletrodeposição de cromo duro, um técnico químico, um supervisor de produção, dois operadores, um mecânico e um eletricista.

3. Criação do mapa de raciocínio: na primeira reunião do time de trabalho foram levantadas questões importantes sobre o problema estudado e sobre o processo de eletrodeposição de cromo duro. O mapa de raciocínio foi atualizado a cada resultado obtido e a cada novo questionamento até o fim do trabalho.

4. Definição dos clientes mais afetados pelo problema: a definição dos clientes mais afetados pelos defeitos de mancha e queima na face foi realizada através da análise dos dados de retrabalho referente ao período de janeiro a julho de 2007.

5. Mapeamento do processo: o mapeamento do processo foi realizado pelo time de trabalho *in loco* e todas as entradas e saídas do processo de eletrodeposição de cromo duro foram listadas para posterior análise.

6. Análise do sistema de medição: os dados para a o MSA foram coletados através da criação de 10 válvulas padrão, sendo 05 consideradas reprovadas devido a problemas de mancha e queima na face e 05 consideradas aprovadas, ou seja, peças sem mancha e queima na face. Dois operadores e um auditor da qualidade do primeiro turno e dois operadores e um auditor da qualidade do segundo turno fizeram três leituras aleatórias de cada válvula padrão. Ao todo foram realizadas 180 leituras e a avaliação do sistema de medição foi feita através dos valores de repetitividade e reprodutibilidade. A figura 31 mostra de uma forma esquemática a estratégia de coleta de dados para o MSA.



**Figura 31:** Esquema da estratégia de coleta de dados para a análise do sistema de medição.

7. Identificação da fase do processo onde surgem as manchas e queimas: para a identificação da fase do processo onde surgem as manchas e queimas na face das válvulas, o time de trabalho acompanhou a produção de 500 peças.

8. Construção da matriz de causa e efeito: a matriz de causa e efeito foi construída pelo time de trabalho, que se reuniu para avaliar e pontuar as principais entradas e saídas do processo de eletrodeposição de cromo duro.

9. Análise estatística multivariada: para a realização da análise estatística multivariada foram coletadas 500 válvulas de 05 diferentes especificações, totalizando uma quantidade de 2500 peças analisadas.

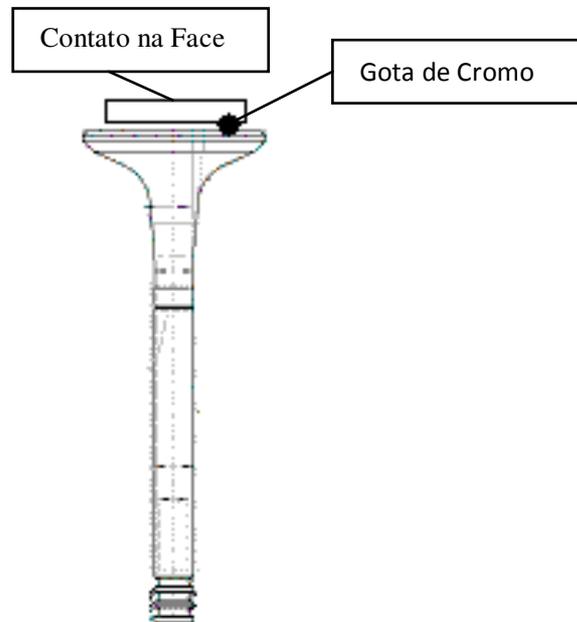
10. Análise de regressão linear simples com os parâmetros Amperagem por decímetro<sup>2</sup> e velocidade de cromação: para a realização desta análise foram definidos 15 diferentes valores de Amperagem por decímetro<sup>2</sup> e velocidade de cromação e para cada setup do equipamento foram inspecionadas 500 válvulas do Cliente A.

11. Análise de regressão linear simples com as variáveis cromo na superfície da válvula e temperatura da válvula: para entender o efeito do cromo na face da válvula foi simulado em laboratório o processo de eletrodeposição de cromo. O esquema da figura 32 nos mostra como o teste foi realizado, após o dispositivo de teste estar montado, foi depositada uma gota de cromo na face da válvula e avaliou-se a resistência elétrica no ponto onde o cromo foi depositado. Ao todo foram realizadas 16 rodadas de teste.

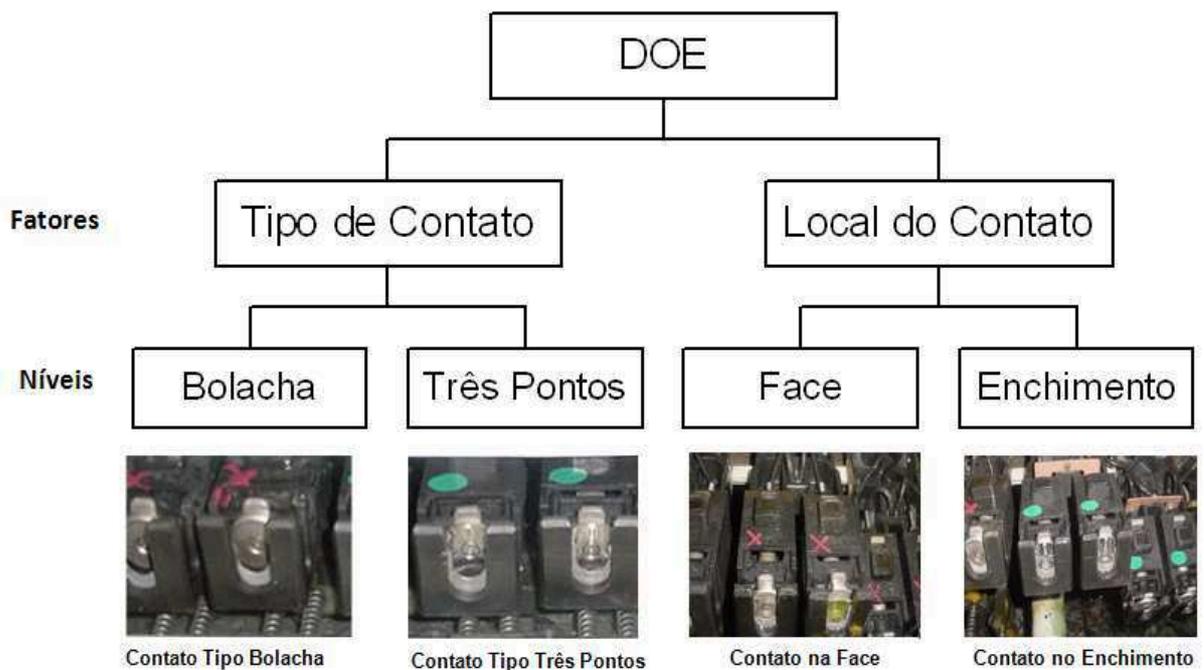
12. Delineamento de experimento com a variável de entrada tipo de gancheira: o delineamento de experimento em questão apresenta com dois níveis ( $2^k$ ), dois fatores e uma réplica. Ao todo foram conduzidas 08 corridas experimentais com 1000 válvulas cada uma, o que representa 8000 válvulas testadas. A figura 33 mostra de forma esquemática o detalhamento dos fatores e níveis estudados neste experimento.

13. Teste do sistema de exaustão: na primeira rodada deste teste foi instalado um ventilador pequeno no sistema de exaustão e 4000 válvulas foram coletadas para análise. Para a segunda rodada deste experimento, foi instalado um ventilador de maior capacidade no sistema de exaustão e um lote de 10000 peças foi analisado.

14. Definição do plano de controle: após definição da solução do problema foi realizado uma reunião para avaliar e definir os controles que deveriam ser implementados no processo para garantir a não recorrência do problema.



**Figura 32:** Desenho esquemático do teste realizado em laboratório para a coleta de dados para a análise de regressão da Resistência Elétrica da peça versus a temperatura da peça.



**Figura 33:** Esquema do delineamento de experimentos utilizando a variável de entrada tipo de gancheira

## **7. Resultados e Discussões**

Na condução deste trabalho o autor utilizou a metodologia Seis Sigma, junto a abordagem do DMAIC, para identificar a causa raiz dos problemas de mancha e queima na face das válvulas automotivas. Problemas estes gerados no processo de eletrodeposição de cromo duro na haste da válvula. Neste tópico serão detalhados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia Seis Sigma.

Uma questão central nos programas Seis Sigma é a definição dos projetos que receberão aporte de recursos da organização. O processo de seleção deve assegurar a alocação ideal dos recursos em projetos prioritários, alinhados a estratégia da empresa com impacto não só na melhoria da eficiência, mas sobretudo na eficácia da empresa, garantindo-lhe a obtenção de vantagem competitiva.

Foi pensando nesta vantagem competitiva, que surgiram os questionamentos sobre o processo de lixamento da face das válvulas para a remoção das manchas e queimas inerentes ao processo de eletrodeposição de cromo duro.

### **7.1 Fase de Definição**

#### **7.1.1 Linha de Base**

Após acompanhamento do processo e levantamento de dados, foi constatado que em média eram retrabalhadas 477.349 peças por mês, visto o custo unitário do retrabalho de R\$0,1924 por válvula, ao longo de um mês eram gastos em média R\$91.841,92 e conseqüentemente no período de um ano a empresa deixava de economizar R\$1.102.103,37.

O gráfico 05 mostra as quantidades de peças que foram retrabalhadas nos meses de janeiro a junho de 2007. É possível verificar uma tendência de aumento no número de válvulas retrabalhadas ao longo dos meses.

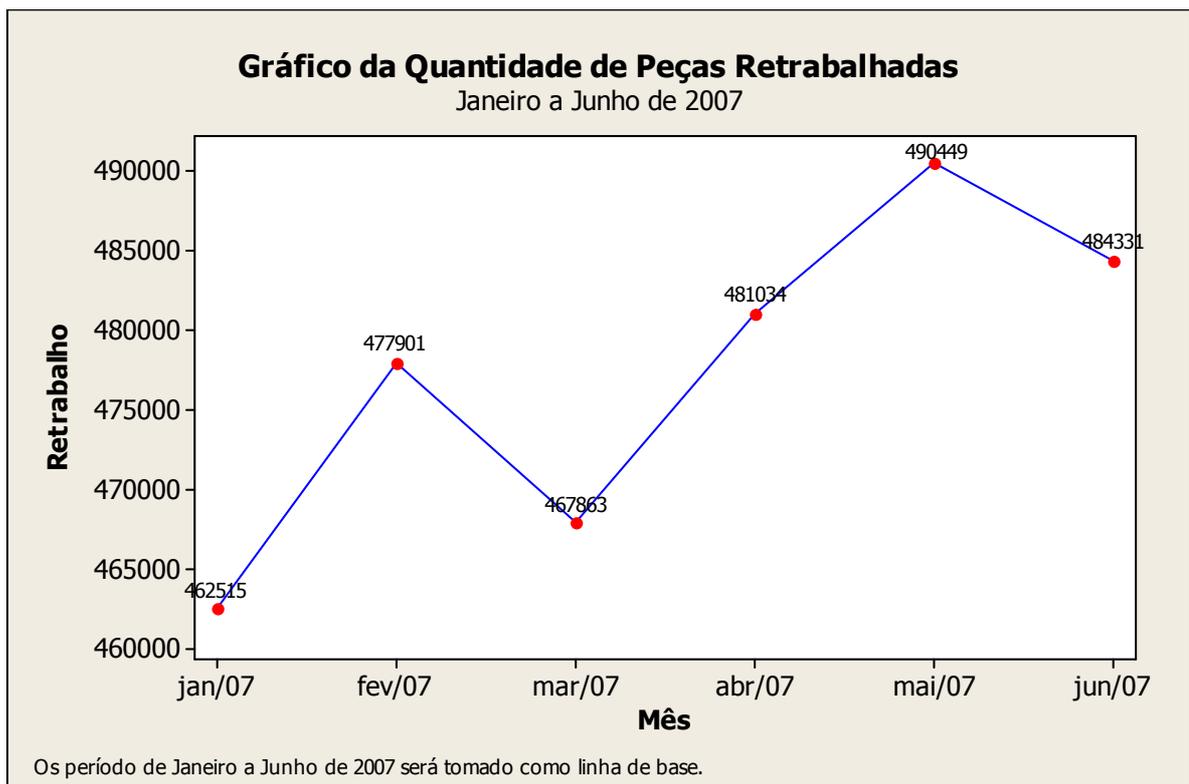
Os dados coletados no período de janeiro a julho de 2007 foram definidos como linha de base, servindo para avaliar a melhoria do processo e a efetividade das ações de melhoria tomadas ao longo do projeto.

Visto a priorização da diretoria frente a este projeto, foi formado um time multifuncional composto por um Green Belt, um engenheiro de processos especialista em eletrodeposição de cromo duro, um técnico químico, dois operadores de produção, um supervisor de produção, um mecânico e um eletricitista.

Para obter sucesso em um projeto Seis Sigma é fundamental a escolha de um time multifuncional, motivado, comprometido e acima de tudo, que esteja

disposto a quebrar todos os paradigmas formados ao longo do tempo sobre o processo a ser estudado.

Apesar de a metodologia Seis Sigma trabalhar baseada em dados, as ferramentas que direcionam os estudos, tais quais, mapa de raciocínio, mapa de processo e matriz de causa e efeito são subjetivas e precisam da participação efetiva dos membros do time.

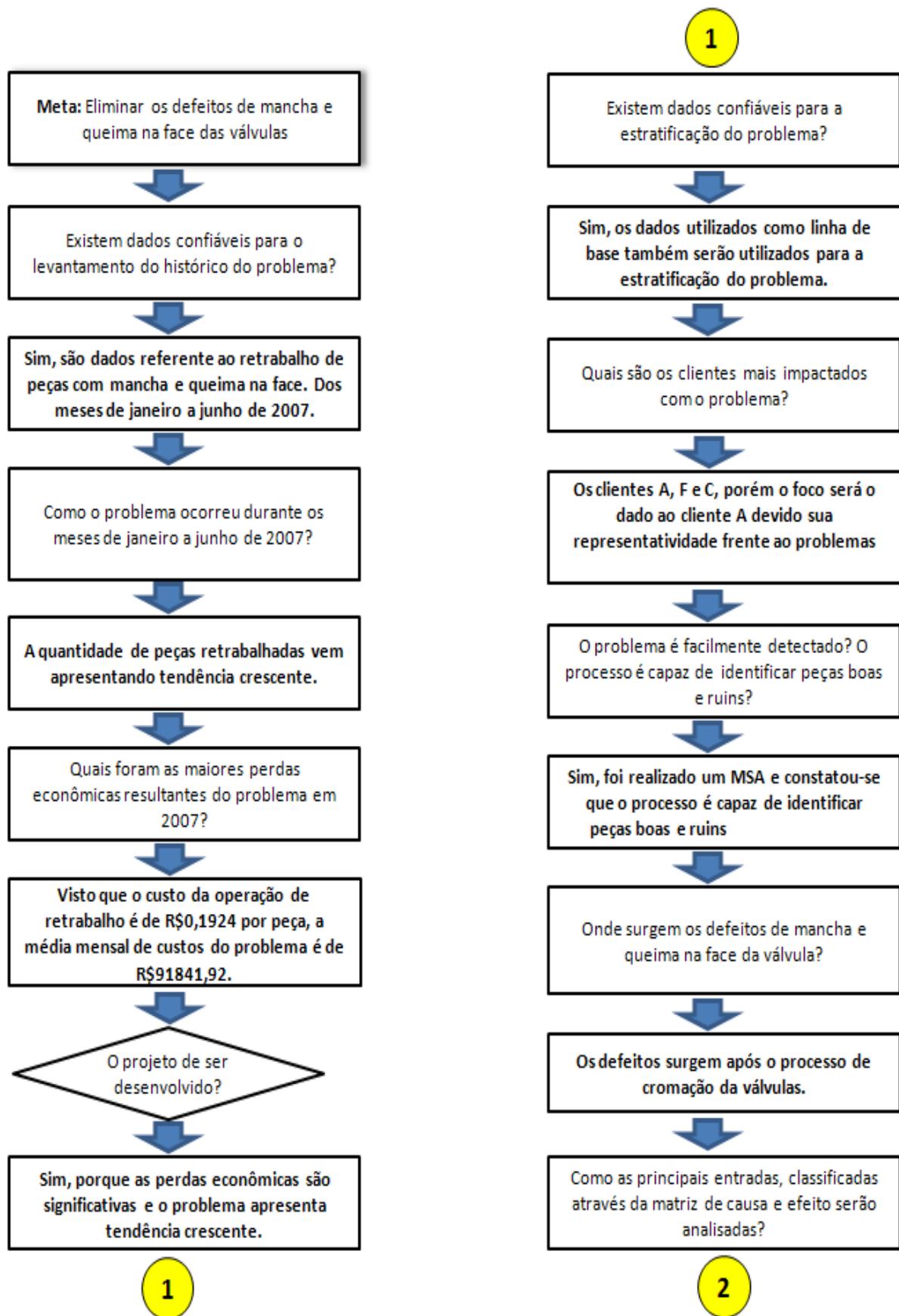


**Gráfico 05:** Gráfico da quantidade de peças retrabalhadas no período entre janeiro e junho de 2008.

### 7.1.2 Mapa de Raciocínio

Na primeira reunião foi apresentada ao time de trabalho uma ferramenta chamada mapa de raciocínio ou mapa de pensamento.

A figura 34 mostra a última versão do mapa de raciocínio do projeto Seis Sigma para a eliminação das manchas e queimas na face das válvulas automotivas, inerentes ao processo de eletrodeposição de cromo duro.



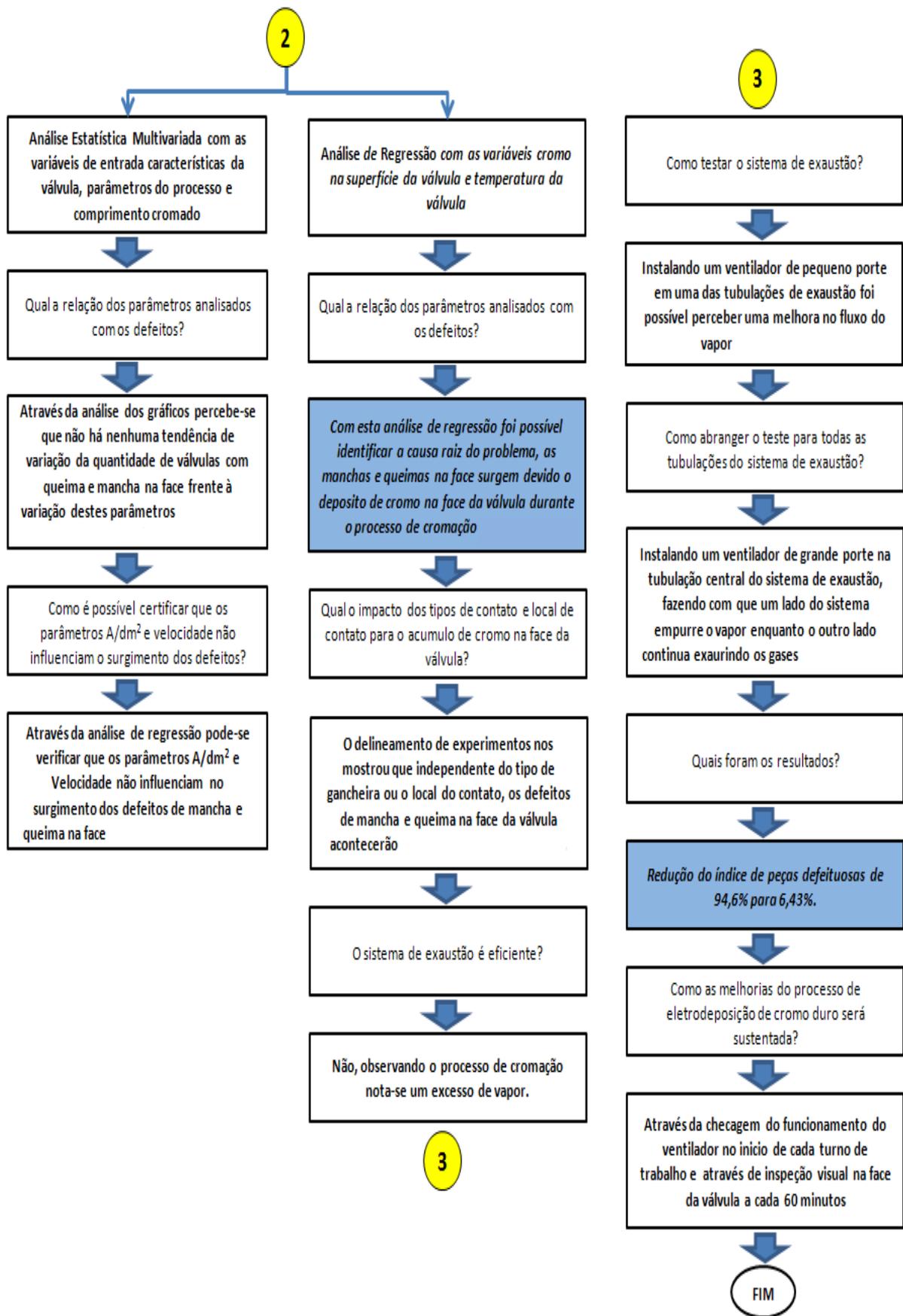


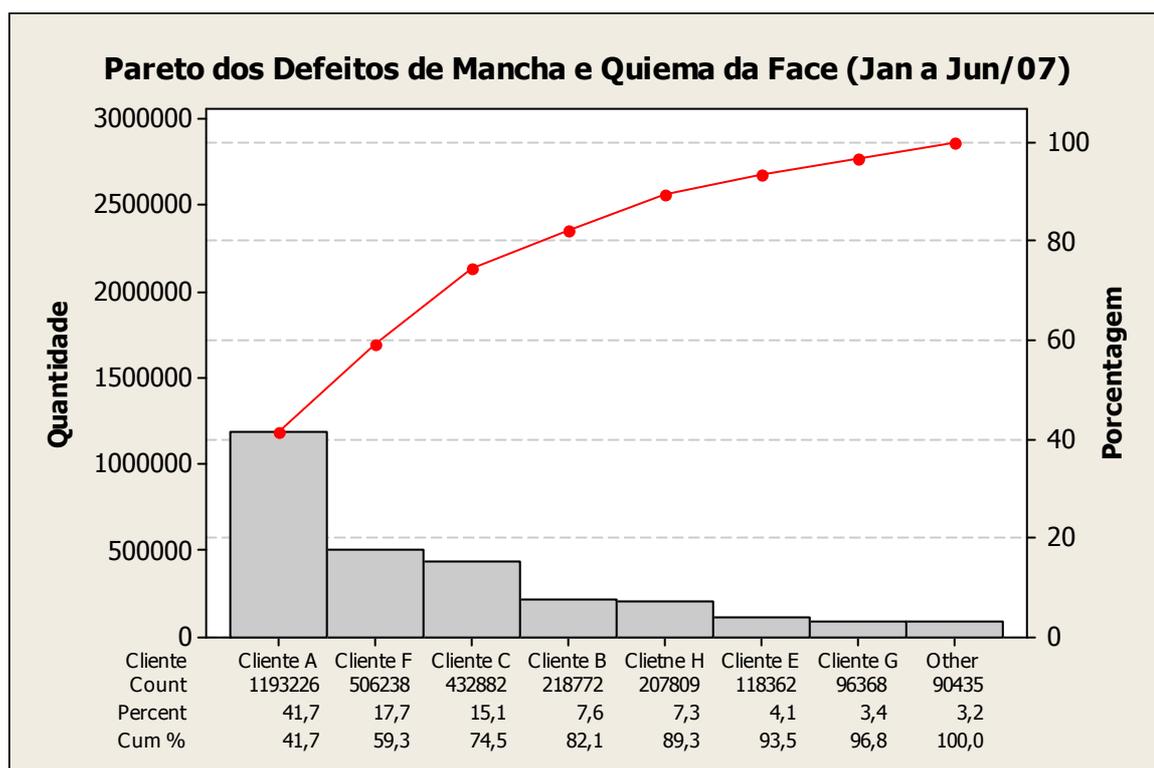
Figura 34: Mapa de Raciocínio

## 7.2 Fase de Medição

### 7.2.1 Diagrama de Pareto

Para a obtenção de melhores resultados na coleta de dados e na análise dos mesmos, foi construído um Diagrama de Pareto com o objetivo de avaliar os defeitos de mancha e queima na face das válvulas frente aos principais clientes da empresa em estudo.

O gráfico 06 nos mostra que, para o período de Janeiro a Junho de 2007, as peças do Cliente A representaram 41,7% de todas as válvulas retrabalhadas devido ao problema de mancha e queima na face, totalizando uma quantidade de 1.193.226 peças. É importante ressaltar que essa quantidade de peças representa 100% da produção de válvulas do cliente A no período estudado. Sendo assim, os estudos foram direcionados para as válvulas do Cliente A.



**Gráfico 06:** Diagrama de Pareto dos Defeitos de Mancha e Queima na Face (Jan a Jun/07)

### 7.2.2 Mapeamento do Processo

Após a definição de trabalhar com as válvulas do Cliente A, visto sua criticidade e representatividade frente aos problemas de mancha e queima na face, o time de trabalho se deslocou até o processo de cromação para iniciar a construção de um mapa de processo (figura 35).

Durante a construção do Mapa de Processo o time de trabalho constatou a importância de uma correta avaliação dos problemas de mancha e queima na face pelos operadores responsáveis em realizar a inspeção final na peça.

Esses operadores também são responsáveis em definir a disposição das peças segregadas, sendo assim, qualquer avaliação errônea dos defeitos poderia aumentar o retrabalho de mancha e queima na face, tal como, aumentar o risco do cliente receber peças defeituosas.

O time de trabalho conduziu uma Análise do Sistema de Medição (MSA) para verificar a capacidade do processo de medição detectar peças boas e ruins. Visto a natureza dos dados foi realizado um MSA para dados atributivos.

### **7.2.3 Análise do Sistema de Medição**

Os dados para a o MSA foram coletados através da criação de 10 válvulas padrão, sendo 05 consideradas reprovadas devido a problemas de mancha e queima e 05 consideradas aprovadas, ou seja, peças sem mancha e queima na face.

Dois operadores e um auditor da qualidade do primeiro turno e dois operadores e um auditor da qualidade do segundo turno fizeram três leituras aleatórias de cada válvula padrão.

Ao todo foram realizadas 180 leituras e a avaliação do sistema de medição foi feita através dos valores de repetitividade e reprodutibilidade.

A partir dos resultados mostrados na tabela 06 e tabela 07, podemos dizer que o sistema de medição utilizado no estudo de caso, é capaz de identificar os defeitos de mancha e queima na face das válvulas, pois os níveis de concordância para repetitividade e reprodutibilidade são maiores que 70%.

### **7.2.4 Identificação da fase do processo onde surgem as manchas e queimas**

Através do Diagrama de Pareto identificou-se que o Cliente A é o mais crítico frente ao problema de mancha e queima na face, o Mapa de Processo, expôs todas as principais entradas e saídas do processo e a análise do sistema de medição verificou que o problema pode ser detectado de uma forma capaz e eficiente.



Figura 35: Mapa de Processo.

**Tabela 06:** Repetitividade do Sistema de Medição.

<b>Operador</b>	<b>Quantidade de Peças Inspeccionadas</b>	<b>Quantidade de Leituras com Repetitividade</b>	<b>Nível de Concordância</b>
Op 01	10	10	100%
Op 02	10	10	100%
Op 03	10	9	90%
Op 04	10	10	100%
Op 05	10	9	90%
Op 06	10	10	100%

**Tabela 07:** Reprodutibilidade do Sistema de Medição.

<b>Operador</b>	<b>Quantidade de Peças Inspeccionadas</b>	<b>Quantidade de Leituras com Reprodutibilidade</b>	<b>Nível de Concordância</b>
Op 01	10	10	100%
Op 02	10	10	100%
Op 03	10	8	80%
Op 04	10	10	100%
Op 05	10	9	90%
Op 06	10	10	100%

Embora o Mapa de Processo tenha indicado o surgimento das manchas e queimas na face da válvula somente após o processo de cromação, o time de trabalho decidiu acompanhar 500 peças do Cliente A ao longo das fases do processo para certificar-se sobre esta suspeita.

A tabela 8 nos mostra claramente que os problemas de mancha e queima na face foram identificadas após o cromo em 100% das peças, ou seja, os problemas surgem no processo de cromação (figura 36). Em posse desta conclusão o time identificou as entradas mais críticas do processo, através da ferramenta de priorização chamada Matriz de Causa e Efeito.

**Tabela 08:** Identificação da fase do processo onde surgem as manchas e queimas na face da válvula

Fase do Processo	Quantidade de Peças	Quantidade de Manchas	Quantidade de Queimas	Total de Peças Defeituosas
Antes do carregamento	500	0	0	0
Após o desengraxe	500	0	0	0
Após a lavagem com água I	500	0	0	0
Após o pré-cromo	500	0	0	0
Após o cromo	500	315	185	500
Após a lavagem com água II	500	315	185	500



**Figura 36:** Processo de cromação onde os defeitos de mancha e queima na face surgem.

## 7.3 Fase de Análise

### 7.3.1 Matriz de Causa e Efeito

Para a construção da Matriz de Causa e Efeito, foram analisadas todas as saídas do mapa de processo e o time de trabalho selecionou as saídas Queima na Face e Mancha na Face atribuindo o índice de importância 10 e 08 a cada uma delas respectivamente.

Todas as entradas foram avaliadas e classificadas de acordo com o impacto das mesmas sobre as saídas selecionadas. E a classificação foi feita de acordo com a pontuação 0, 1, 3 e 9.

Como citado anteriormente a Matriz de Causa e Efeito (figura 37), contribui na priorização das principais variáveis de entrada levantadas no mapeamento do processo. Sendo assim o time definiu como linha de corte um valor de *Impacto Total* de 162 onde todas as variáveis de entrada com pontuação igual ou superior a 162 seriam analisadas.

A Matriz de Causa e Efeito é uma ferramenta subjetiva, que depende do conhecimento dos componentes do time e é importante que seja feita uma análise crítica sobre a matriz para verificar se existe alguma variável de entrada importante que não foi classificada dentro da linha de corte definida pelo time.

Sendo assim, neste estudo de caso, 04 variáveis de entrada foram selecionadas através da classificação do valor de *Impacto Total* e outras 03 foram selecionadas através da análise crítica do time de trabalho. As variáveis de entradas selecionadas através do valor de *Impacto Total* foram:

- Características da válvula;
- Cromo na superfície da válvula;
- Parâmetros do processo;
- Temperatura da válvula;

As variáveis de entradas selecionadas através da análise crítica do time de trabalho foram:

- Tipo de gancheira;
- Sistema de exaustão;
- Comprimento cromado.

Com a Matriz de Causa e Efeito concluída, o time de trabalho definiu 04 diferentes estudos, utilizando as variáveis de entrada selecionadas, com o intuito de identificar a causa raiz dos defeitos de mancha e queima na face da válvula. Os estudos definidos foram:

- *Análise Estatística Multivariada com as variáveis de entrada características da válvula, parâmetros do processo e comprimento cromado:* o objetivo deste estudo é avaliar se há alguma tendência na quantidade de defeitos na face da válvula frente à variação dos parâmetros do processo, características de construção das válvulas e o comprimento cromado da haste de cada modelo de válvula;

- *Análise de Regressão com os parâmetros Amperagem/dm<sup>2</sup> e Velocidade de Cromação:* o objetivo desta análise é verificar o quanto da variabilidade das

variáveis de saída mancha e queima na face da válvula são causadas pela variabilidade dos parâmetros do processo Amperagem/dm<sup>2</sup> e Velocidade de Cromação;

- *Análise de Regressão com as variáveis cromo na superfície da válvula e temperatura da válvula:* o objetivo desta análise é identificar uma relação entre o cromo que respinga sobre a face da válvula no processo de cromação e a temperatura da válvula no processo de cromação com os defeitos de queima e mancha na face.

### 7.3.2 Análise Estatística Multivariada

Neste estudo de caso, o objetivo é avaliar se as variáveis de saída mancha e queima na face apresentam alguma tendência baseada na variação das variáveis de entrada.

As variáveis de entrada características da válvula, parâmetros do processo e comprimento cromado foram parametrizadas da seguinte maneira:

- **Características da Válvula:**
  - Material: XYZ1, XYZ222/1 e XYZ247/1;
  - Tipo de Construção: Monometálica e Bimetálica;
  - Diâmetro da Haste: 4,972; 5,948; 5,956; 7,940 e 7,970;
  - Diâmetro da Cabeça: 27,35; 29,70; 32; 35,90 e 40;
  - Área da Face Usinada: 147,4; 210; 227; 774,4 e 1256,6;
  - Camada de Cromo: 5,5; 7; 7,5; 9 e 11,5;
- **Comprimento Cromado:**
  - Comprimento Cromado: 80; 81,95; 83,3; 93,2 e 150;
  - Distância Face-Transição: 4,7; 22,8; 24; 32,5 e 32,7;
- **Parâmetros do Processo:**
  - Corrente: 3000, 4000, 4800 e 5800;
  - Amperagem por decímetro<sup>2</sup> (A/dm<sup>2</sup>): 89,95; 133,04; 135,61; 139,27 e 148,95;
  - Velocidade: 380, 400, 450, 600 e 650 rpm.

Neste estudo foram coletadas 500 válvulas de 05 diferentes tipos totalizando uma quantidade de 2500 peças analisadas e os resultados obtidos são apresentados através dos gráficos 07 e 08.

Antes da realização da análise estatística multivariada, os especialistas do processo de Eletrodeposição de Cromo Duro acreditavam que os principais causadores de manchas e queimas na face das válvulas seriam a regulagem do processo de velocidade e da amperagem/dm<sup>2</sup>.

Através da análise dos gráficos percebe-se que não há nenhuma tendência de variação da quantidade de válvulas com queima e mancha na face frente à variação destes parâmetros, ou seja, todos os valores ajustados de velocidade e amperagem por dm<sup>2</sup> apresentaram defeitos de mancha e queima na face da peça e para nenhum dos parâmetros estudados foi encontrada uma tendência significativa onde a variação da variável e saída poderia ser explicada pela variação das variáveis de entrada.

Sendo assim, o efeito mais construtivo deste estudo foi a quebra do paradigma de que os parâmetros citados acima são os causadores dos defeitos de mancha e queima na face.

Para certificar-se desta conclusão foram realizadas outras duas análises de regressão levando em conta os parâmetros de velocidade e amperagem por dm<sup>2</sup>.

### **7.3.3 Análise de regressão linear simples com os parâmetros Amperagem por decímetro<sup>2</sup> e velocidade de cromação**

A análise de regressão linear simples com os parâmetros A/dm<sup>2</sup> e velocidade de cromação foi realizada para confirmar a análise estatística multivariada que indicou que estes parâmetros não influenciam na geração dos defeitos de mancha e queima na face.

Para a realização desta análise foram definidos 15 diferentes valores de Amperagem por Decímetro<sup>2</sup> e Velocidade de Cromação e para cada setup do equipamento foram inspecionadas 500 válvulas do Cliente A. As tabelas 09 e 10 mostram os valores coletados no experimento. Ao todo foram inspecionadas 15000 peças.

A análise gráfica dos dados da tabela 09 nos mostra que para os valores de A/dm<sup>2</sup> estudados o coeficiente de determinação para mancha e queima na face das válvulas são baixos, com os respectivos valores de 22,5% e 0,9% (gráficos 09 e 10).

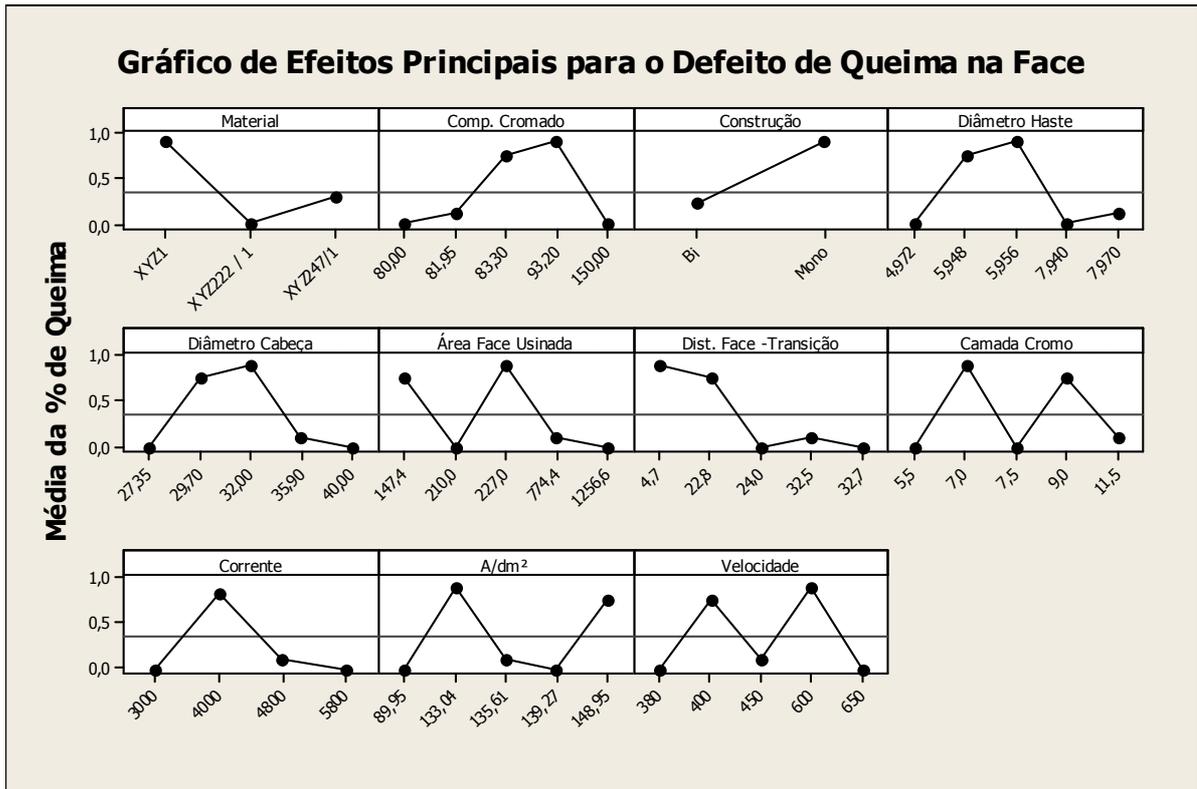
Isto quer dizer que apenas 22,5% da variabilidade da porcentagem de queima na face das válvulas é explicada pela variabilidade do parâmetro A/dm<sup>2</sup> e quando é analisado a porcentagem de mancha na face a variabilidade explicada cai para 0,9%.

A análise gráfica dos dados da tabela 10 nos mostra que para os valores de Velocidade estudados o coeficiente de determinação para mancha e queima na face das válvulas são baixos, com os respectivos valores de 14,7% e 1,1% (gráficos 11 e 12).

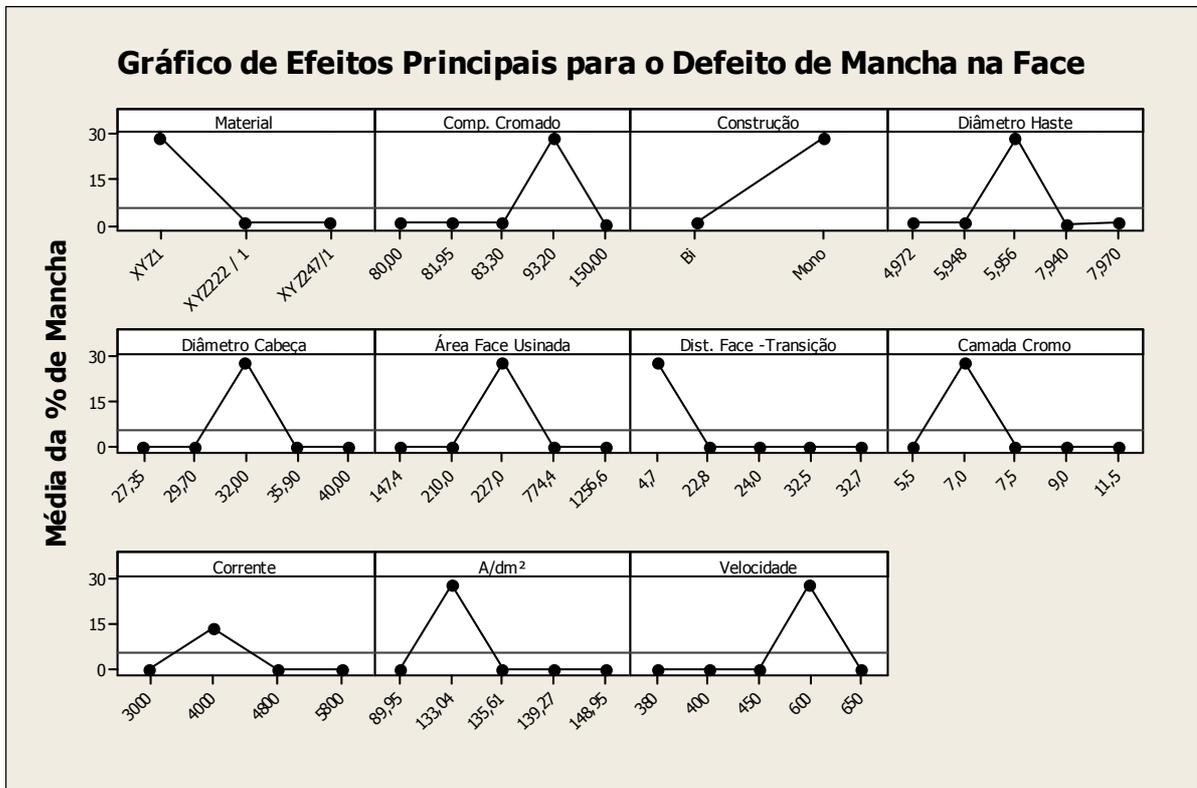
Isto quer dizer que apenas 14,7% da variabilidade da porcentagem de queima na face das válvulas é explicada pela variabilidade do parâmetro Velocidade e quando é analisado a porcentagem de mancha na face a variabilidade explicada cai para 1,1%.

<b>Matriz de Cause e Efeito</b>						
Índice de Importância ao Cliente			10	8		
			1	2	3	
			Saídas			Impacto Total
			Queima na face	Mancha na Face		
	Processo	Entradas	Pontuação da Entrada			
1	Cromo	Características da válvula	9	9		162
2	Cromo	Cromo na superfície da válvula	9	9		162
3	Cromo	Parâmetros do processo	9	9		162
4	Cromo	Temperatura da válvula	9	9		162
5	Cromo	Tipo de gancheira	9	1		98
6	Cromo	Banho	9	1		98
7	Cromo	Sistema de exaustão	3	3		54
8	Cromo	Comprimento cromado	3	3		54
9	Pré-Cromo	Anodo	3	3		54
10	Cromo	Anodo	3	3		54
11	Cromo	Água de lavagem	3	3		54
12	Cromo	Agitação	3	1		38
13	Pré-Cromo	Energia	1	3		34
14	Pré-Cromo	Temperatura	1	1		18
15	Pré-Cromo	Agitação	1	1		18
16	Pré-Cromo	Válvula lavada	0	0		0
17	Pré-Cromo	Água na válvula	0	0		0
18	Pré-Cromo	Banho	0	0		0

**Figura 37:** Matriz de Causa e Efeito



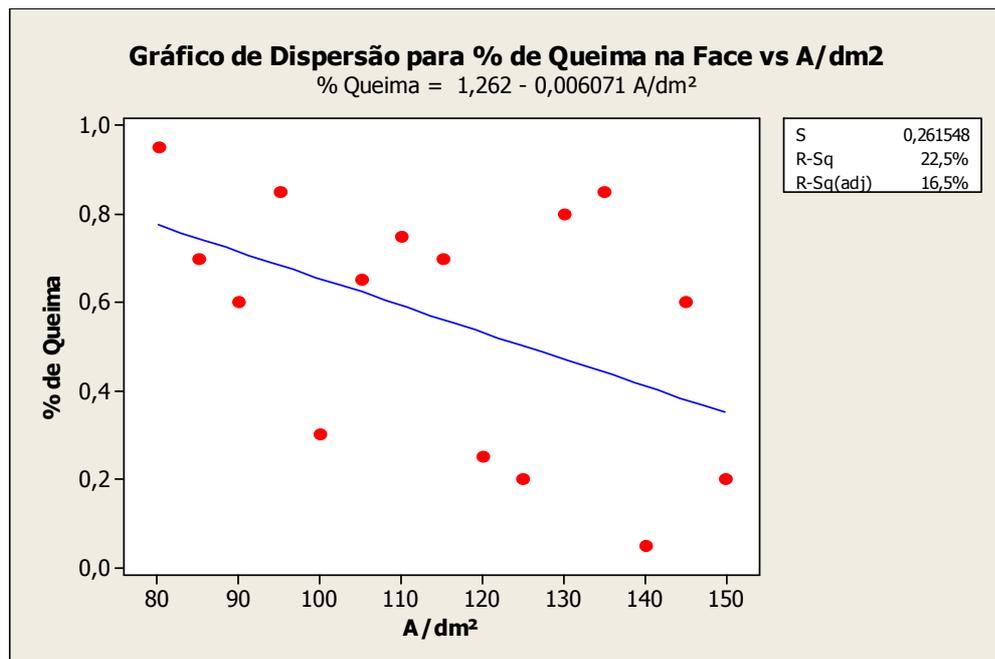
**Gráfico 07:** Gráfico de efeitos principais para o defeito de queima na face.



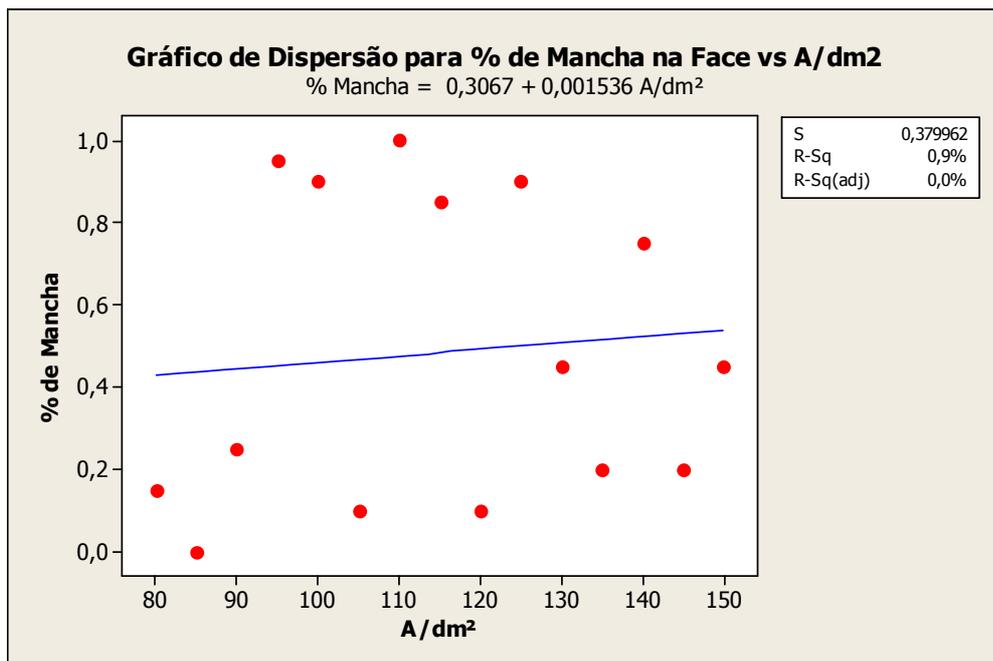
**Gráfico 08:** Gráfico de efeitos principais para o defeito de mancha na face.

**Tabela 09:** Porcentagem de mancha e queima na face da válvula para vários valores de A/dm<sup>2</sup>

A/dm <sup>2</sup>	%Queima para A/dm <sup>2</sup>	%Mancha para A/dm <sup>2</sup>
145	60%	20%
135	85%	20%
150	20%	45%
95	85%	95%
115	70%	85%
85	70%	0%
100	30%	90%
130	80%	45%
120	25%	10%
80	95%	15%
90	60%	25%
110	75%	100%
105	65%	10%
140	5%	75%
125	20%	90%



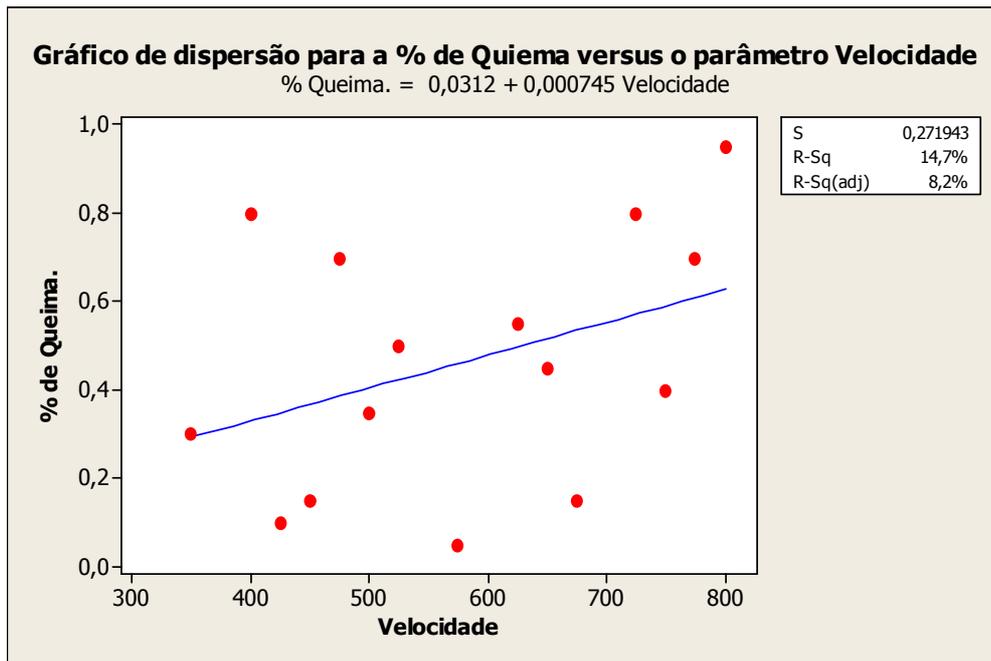
**Gráfico 09:** Gráfico de dispersão para a % de Queima versus o parâmetro A/dm<sup>2</sup>



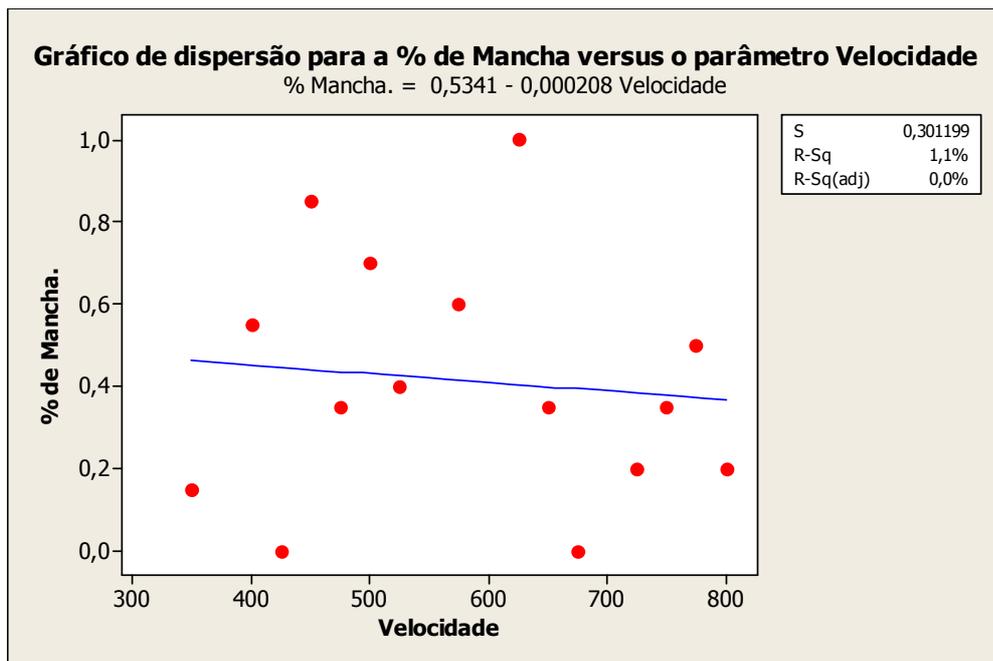
**Gráfico 10:** Gráfico de dispersão para a % de Mancha versus o parâmetro A/dm<sup>2</sup>

**Tabela 10:** Porcentagem de mancha e queima na face da válvula para vários valores de Velocidade

Velocidade	%Queima para Velocidade	%Mancha para Velocidade
725	60%	20%
400	85%	20%
525	20%	45%
425	85%	95%
500	70%	85%
650	70%	0%
800	30%	90%
775	80%	45%
450	25%	10%
350	95%	15%
625	60%	25%
750	75%	100%
475	65%	10%
675	5%	75%
575	20%	90%



**Gráfico 11:** Gráfico de dispersão para a % de Queima versus o parâmetro Velocidade



**Gráfico 12:** Gráfico de dispersão para a % de Mancha versus o parâmetro Velocidade

Analisando os gráficos apresentados acima se conclui que os parâmetros Amperagem por  $\text{dm}^2$  e Velocidade explicam muito pouco os defeitos de mancha e queima na face da válvula e confirma a suspeita levantada pela análise multivariada de que a variação destes parâmetros não são a causa raiz dos defeitos em estudo.

#### **7.3.4 Análise de regressão linear simples com as variáveis cromo na superfície da válvula e temperatura da válvula**

Para a construção do mapeamento do processo o time de trabalho passou 04 horas acompanhado o processo de eletrodeposição de cromo duro nas válvulas do Cliente A. Foi observado que após o processo de cromação a face da válvula apresentava respingos de cromo e através da matriz de causa e efeito verificou-se que o time de trabalho considera este fato importante.

Para entender o efeito do cromo na face da válvula foi simulado em laboratório o processo de eletrodeposição de cromo. Após 16 rodadas de teste constatou-se que a resistência elétrica no ponto onde o cromo foi depositado varia conforme a variação de temperatura da peça. Para entender esta variação foi feita uma análise de regressão onde a variável de entrada é a temperatura da peça e a variável de saída é a resistência elétrica do ponto onde o cromo foi depositado. A tabela 11 mostra os valores coletados no experimento.

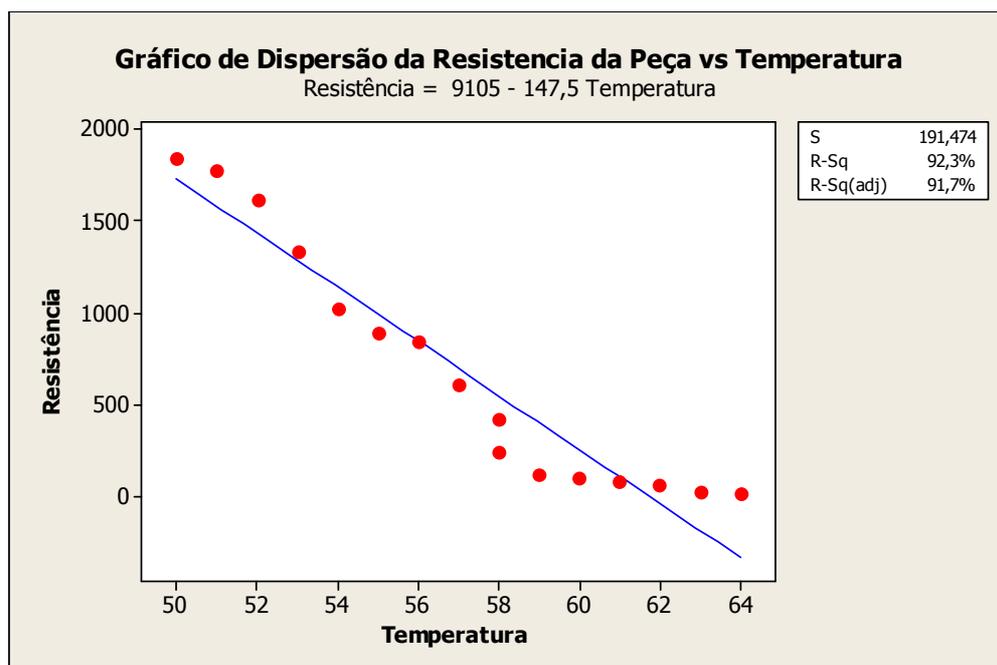
O gráfico de dispersão da resistência da peça no ponto onde o cromo foi depositado versus a temperatura (gráfico 13) mostra um coeficiente de determinação de 92,3%. Isto quer dizer que 92,3% da variabilidade da resistência elétrica na peça é explicada pela variabilidade da temperatura.

Em outras palavras, podemos concluir com este estudo que quando a gota de cromo depositada na face da válvula se seca conforme o aumento da temperatura, diminui a resistência naquele ponto da face facilitando a condutividade elétrica fazendo com que as manchas e queimas apareçam.

Com esta análise de regressão foi possível identificar a causa raiz do problema, as manchas e queimas na face surgem devido o depósito de cromo na face da válvula durante o processo de cromação.

**Tabela 11:** Dados de temperatura e resistência da análise de regressão

Peça	Temperatura (°C)	Resistência (Ω)
1	50	1850
2	51	1780
3	52	1624
4	53	1335
5	54	1025
6	55	897
7	56	845
8	57	613
9	58	421
10	58	239
11	59	124
12	60	97
13	61	82
14	62	60
15	63	21
16	64	15



**Gráfico 13:** Gráfico de dispersão da resistência da peça versus a temperatura.

## 7.4 Fase de Melhoria

### 7.4.1 Delineamento de experimento com a variável de entrada tipo de gancheira

Com o intuito de avaliar como o cromo se depositava na face da válvula e conseqüentemente gerava os defeitos de mancha e queima na face foi realizado um delineamento de experimento com a variável de entrada tipo de gancheira.

O objetivo deste experimento foi avaliar o impacto dos tipos de gancheira frente ao acúmulo de cromo na face da válvula. As saídas analisadas foram mancha e queima na face. Os dados coletados são mostrados na tabela 12.

Os resultados do delineamento de experimento em questão são mostrados através das tabelas de ANOVA (tabelas 13 e 14) e através dos gráficos de Pareto (gráficos 14 e 15) dos efeitos da porcentagem de mancha e queima na face das válvulas experimentadas.

**Tabela 12:** Dados coletados no delineamento de experimentos

Ordem Padrão Experimento	Ordem da Corrida	Quantidade de peças	Tipo de Contato	Local do Contato	% Queima na Face	%Mancha na Face
4	1	1000	Três Pontos	Enchimento	99	78
2	2	1000	Três Pontos	Face	75	96
3	3	1000	Bolacha	Enchimento	98	88
7	4	1000	Bolacha	Enchimento	92	98
8	5	1000	Três Pontos	Enchimento	79	99
1	6	1000	Bolacha	Face	96	86
5	7	1000	Bolacha	Face	85	94
6	8	1000	Três Pontos	Face	87	79

Analisando os dados constata-se que os valores de  $p$  são maiores que 0,05. Isto quer dizer que se aceita a hipótese nula  $H_0$  de que as entradas estudadas não impactam as saídas.

$H_0$ : Entrada (X) não impacta a saída (Y) – ( $p > 0,05$ )

$H_A$ : Entrada (X) impacta a saída (Y) – ( $p \leq 0,05$ )

Em outras palavras, pode-se afirmar que independente do tipo de gancheira ou o local do contato nos níveis experimentados, os defeitos de mancha e queima na face da válvula acontecerão.

A análise dos gráficos de Pareto 14 e 15 deve ser feita levando em consideração a linha base de valor 2,77. Os fatores principais e suas interações serão significativos se cruzarem a linha base.

A interação dos fatores acontece quando a variação da resposta depende da mudança dos níveis de dois ou mais fatores simultaneamente. Os gráficos de interações devem ser analisados a partir da intersecção das duas retas, ou seja, graficamente isto é indicado quando as retas de dois fatores se cruzam. Nota-se nos gráficos 16 e 17 que para os níveis estudados os fatores não se interagem.

Os gráficos de cubo são utilizados para mostrar a relação entre os fatores e uma resposta. Cada cubo pode mostrar três fatores. No estudo de caso em questão, como foram utilizados dois fatores o gráfico de cubo tem a forma de um quadrado.

Os gráficos 18 e 19 mostram em que condições do experimento foram obtidas os menores índices de mancha e queima na face da válvula. Analisando os gráficos pode-se notar que tanto para mancha quanto para queima o menor índice de defeitos foi conseguido utilizando-se o fator tipo de contato no nível três pontos e o fator local do contato no nível face. É importante ressaltar que mesmo nestas condições o índice de defeitos foi superior a 80%.

Este delineamento de experimento foi realizado para verificar se os tipos de contato acumulam mais ou menos cromo na face da válvula fazendo com que apareçam os defeitos de mancha ou queima, visto que a defeito acontece devido ao acúmulo de cromo na face da válvula, porém notou-se que na mudança do local do contato da face para o enchimento da válvula, as manchas e queimas também mudaram de lugar, ou seja, quando o contato era disposto na face as manchas e queimas apareciam na face e quando o contato era disposto no enchimento os defeitos apareciam no enchimento (figura 38).

A observação deste fato direcionou o time de trabalho para as análises no sistema de exaustão do equipamento de eletrodeposição de cromo duro, visto que este fator também indicado na matriz da causa e efeito.



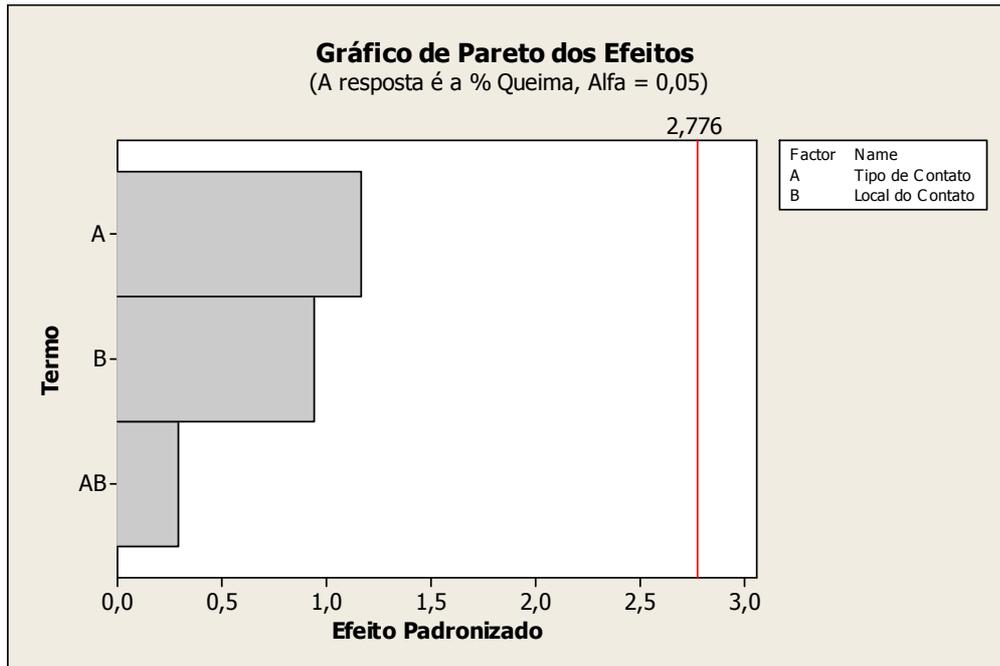
**Figura 38:** Queima no enchimento da válvula

**Tabela 13:** Tabela ANOVA para a porcentagem de Queima na Face

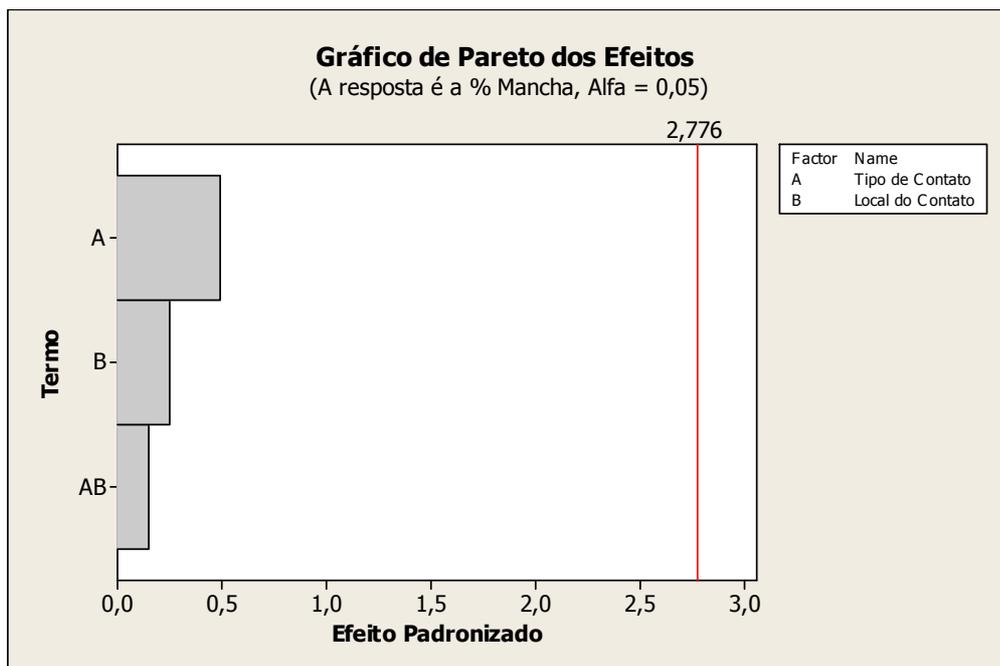
<b>Causas de Variação</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Quadrados Médios</b>	<b>F Calculado</b>	<b>Valor de P</b>
Efeitos Principais	2	191,312	95,656	1,12	0,410
Interação	1	7,031	7,031	0,08	0,788
Erro Residual	4	340,375	85,094		
Erro Puro	4	340,375	85,094		
Total	7	538,719			

**Tabela 14:** Tabela ANOVA para a porcentagem de Mancha na Face

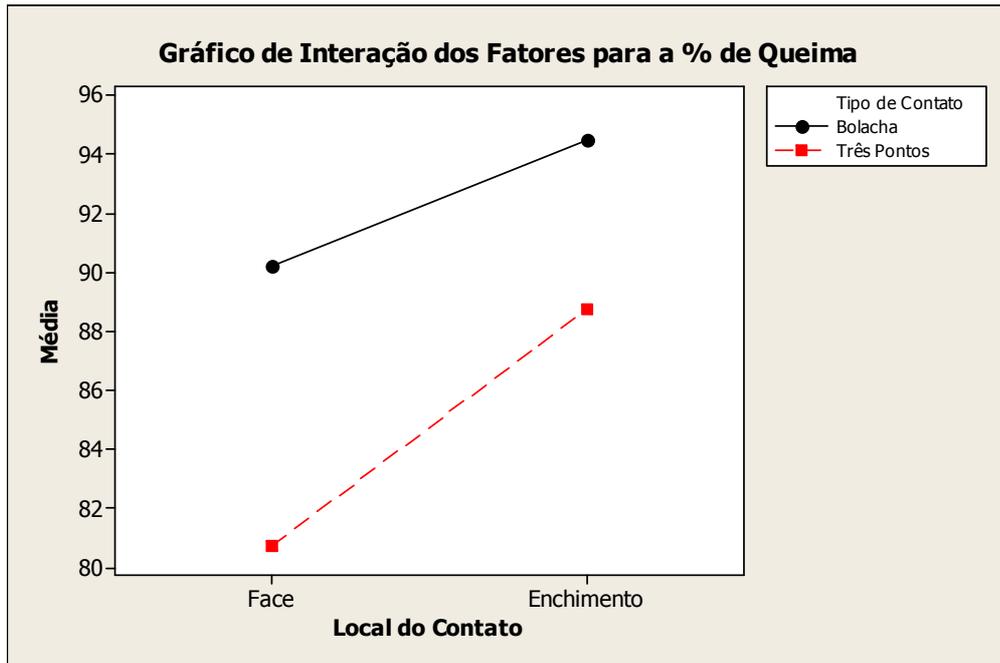
<b>Causas de Variação</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Quadrados Médios</b>	<b>F Calculado</b>	<b>Valor de P</b>
Efeitos Principais	2	33,132	16,656	0,15	0,864
Interação	1	2,531	2,531	0,02	0,887
Erro Residual	4	439,875	109,969		
Erro Puro	4	439,875	109,969		
Total	7	475,819			



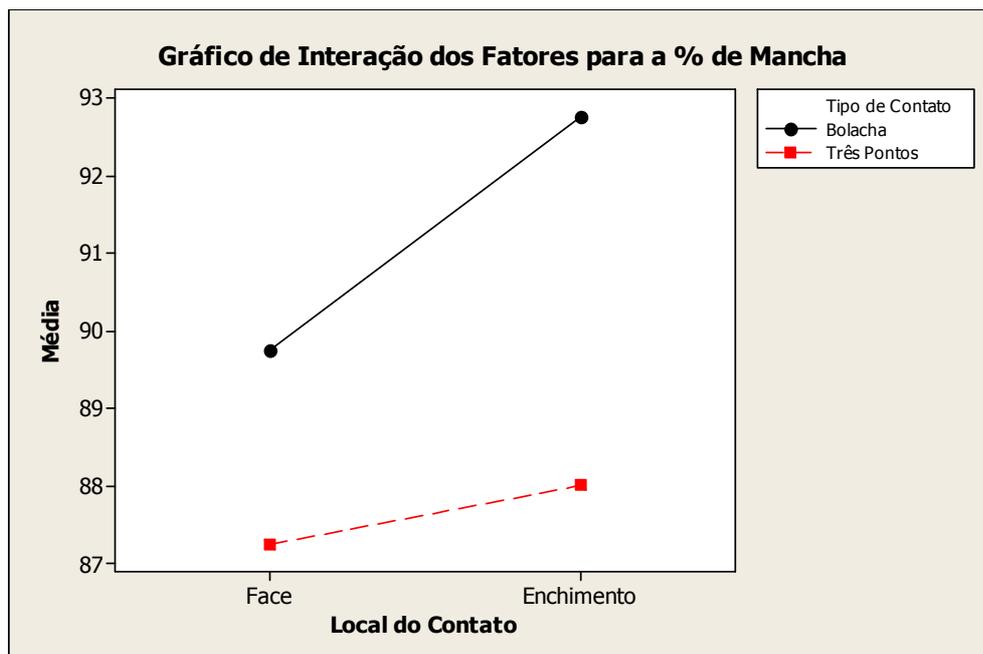
**Gráfico 14:** Gráfico de Pareto dos efeitos para a porcentagem de queima na face das válvulas



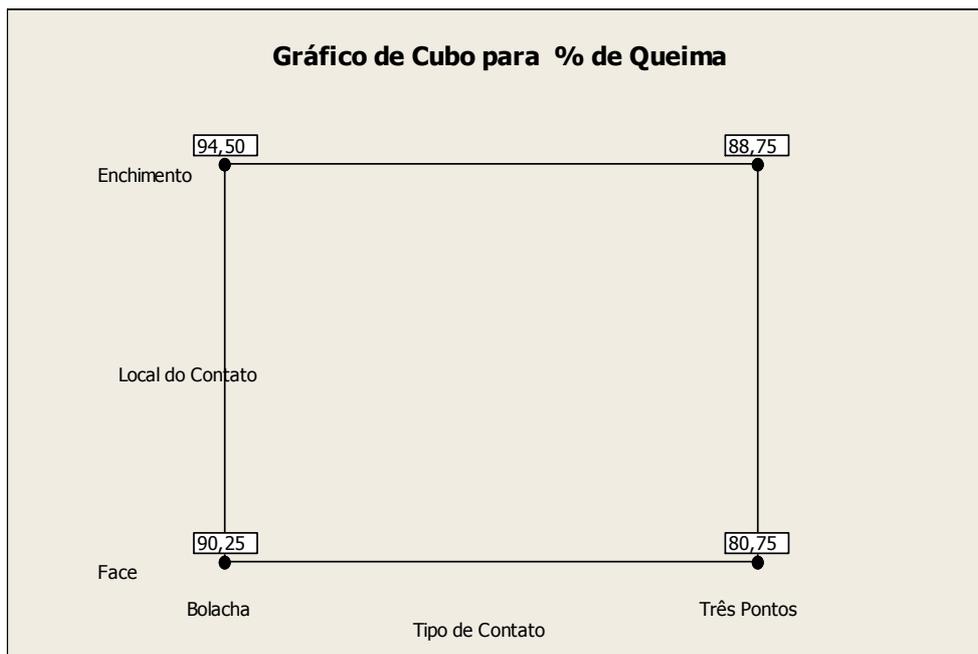
**Gráfico 15:** Gráfico de Pareto dos efeitos para a porcentagem de mancha na face das válvulas



**Gráfico 16:** Gráfico de interação dos fatores para a porcentagem de queima na face das válvulas



**Gráfico 17:** Gráfico de interação dos fatores para a porcentagem de mancha na face das válvulas



**Gráfico 18:** Gráfico de cubo para a porcentagem de queima na face da válvula



**Gráfico 19:** Gráfico de cubo para a porcentagem de mancha na face da válvula.

#### 7.4.2 Teste do Sistema de Exaustão

O objetivo deste teste foi avaliar o impacto do sistema de exaustão no acúmulo de cromo na face da válvula durante o processo de cromação.

O processo de eletrodeposição do cromo duro na haste da válvula acontece devido a um processo de eletrólise. Uma das reações desta eletrólise, é a liberação do H<sub>2</sub>.

O Hidrogênio que é liberado na forma gasosa carrega consigo o ácido crômico, e devido a uma ineficiência do sistema de exaustão do equipamento, as partículas de cromo se depositavam na face da válvula gerando as manchas e queimas.

Como teste inicial, instalou-se um pequeno ventilador em uma das tubulações de exaustão (figura 39) do banho de cromo, fazendo com que um lado ventilasse, enquanto o outro lado exaurisse.

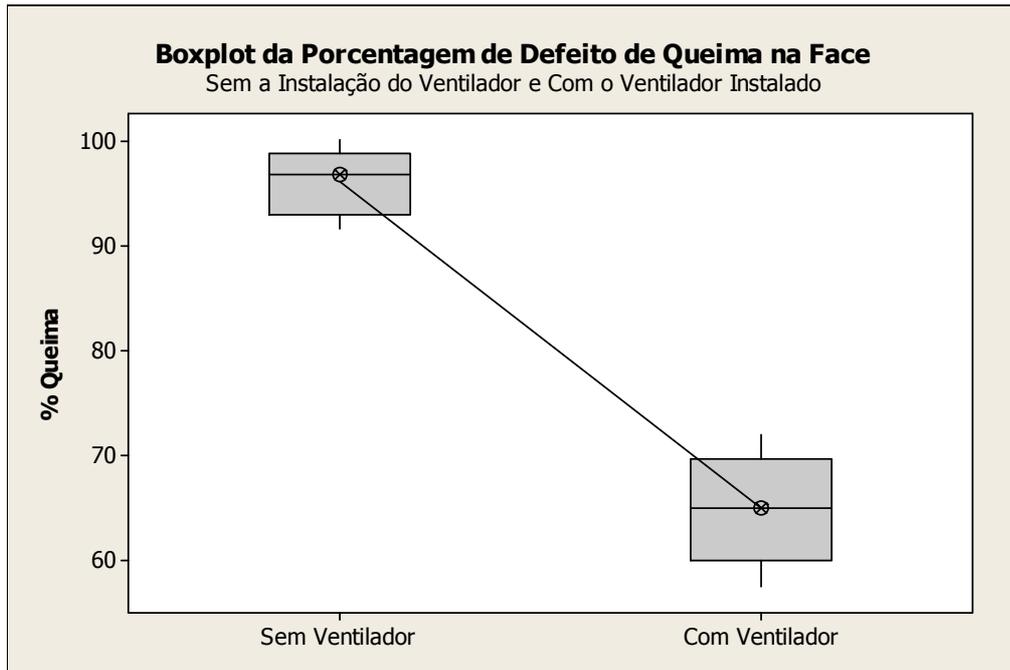
Visualmente foi possível observar uma melhora no fluxo da nuvem de hidrogênio + ácido crômico, mas as manchas e queimas ainda aconteciam. Foram coletadas neste estudo 4000 válvulas e o índice de peças defeituosas para mancha e queima na face foram comparados com os dados coletados em outros testes e análises.

Os gráficos 20 e 21 mostram uma pequena melhora com a instalação deste ventilador, porém o índice de defeitos ainda continuava muito alto, apresentando em média 65% de peças defeituosas.

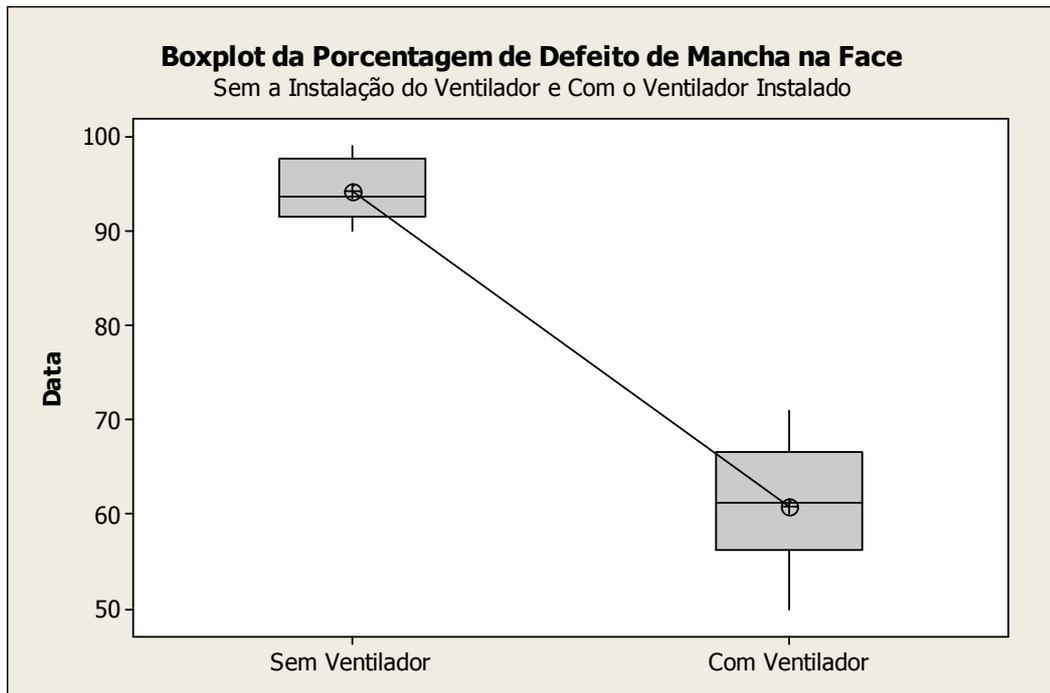
Direcionados pelos dados coletados no primeiro teste no sistema de exaustão, o time decidiu instalar um ventilador com maior capacidade de ventilação em um dos lados da tubulação central do sistema de exaustão do equipamento. As figuras 40 e 41 mostram a tubulação antes e depois da instalação deste novo ventilador.



**Figura 39:** Instalação do ventilador pequeno no sistema de exaustão.



**Gráfico 20:** Boxplot da porcentagem de defeitos de queima na face antes e depois da instalação do ventilador na tubulação de exaustão do equipamento.



**Gráfico 21:** Boxplot da porcentagem de defeitos de mancha na face antes e depois da instalação do ventilador na tubulação de exaustão do equipamento.



**Figura 40:** Tubulação o sistema de exaustão antes da instalação do ventilador.



**Figura 41:** Tubulação o sistema de exaustão depois da instalação do ventilador.

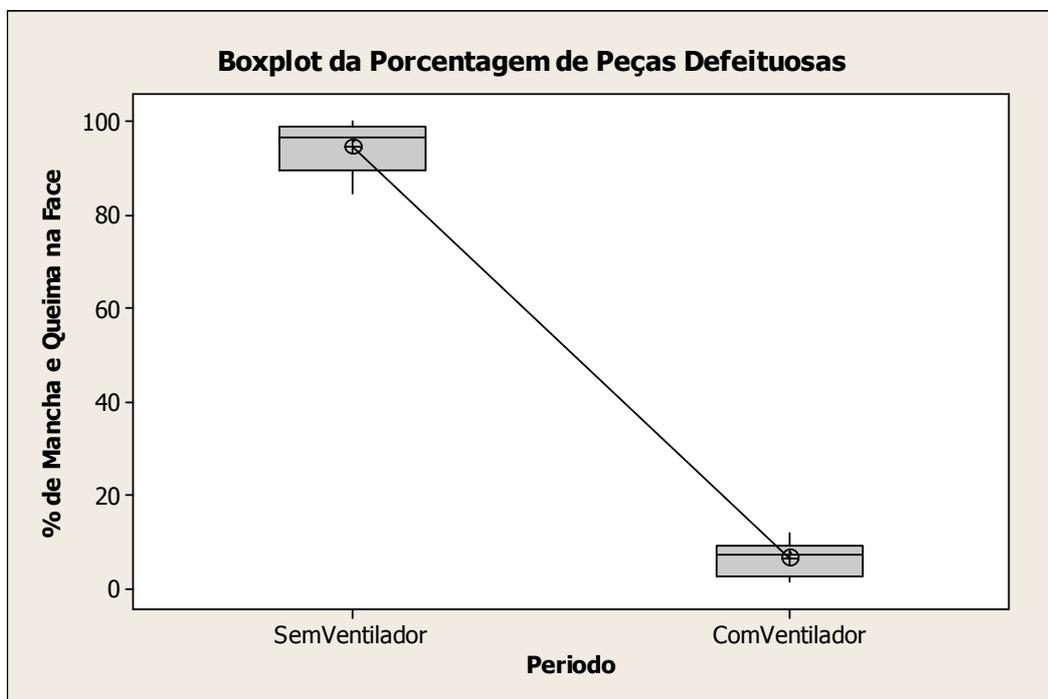
Com a instalação deste ventilador foi perceptível uma melhora significativa do fluxo da nuvem de hidrogênio + ácido crômico. Ao invés dos dois lados do sistema de exaustão exaurir os gases gerados no processo, um lado passou a ventilar e o outro continuou a exaurir, isto funcionou como uma varredura dos gases onde um lado empurra enquanto o outro puxa.

Após a instalação do ventilador foi coletada a amostragem de um lote de 10000 válvulas e os resultados desta análise são mostrados no gráfico 18, onde

temos uma comparação dos dados antes e depois da instalação do ventilador na tubulação central do sistema de exaustão.

O gráfico 22 mostra o índice de peças defeituosas levando em consideração a soma dos defeitos de mancha e queima na face da válvula.

A média da porcentagem das manchas e queimas na face caíram de 94,6% para 6,43%. Concluí-se então que o maior responsável pelo depósito de cromo na face da válvula e conseqüentemente responsável pelos defeitos de mancha e queima era a ineficiência do sistema de exaustão.



**Gráfico 22:** Boxplot da porcentagem de peças defeituosas antes e depois da instalação do ventilador na tubulação central do sistema de exaustão

## 7.5 Fase de Controle

### 7.5.1 Plano de Controle

Para garantir o processo de eletrodeposição de cromo duro na haste da válvula isento de defeitos de mancha e queima na face das peças, foram revisados os documentos de processo e planos de reação do equipamento.

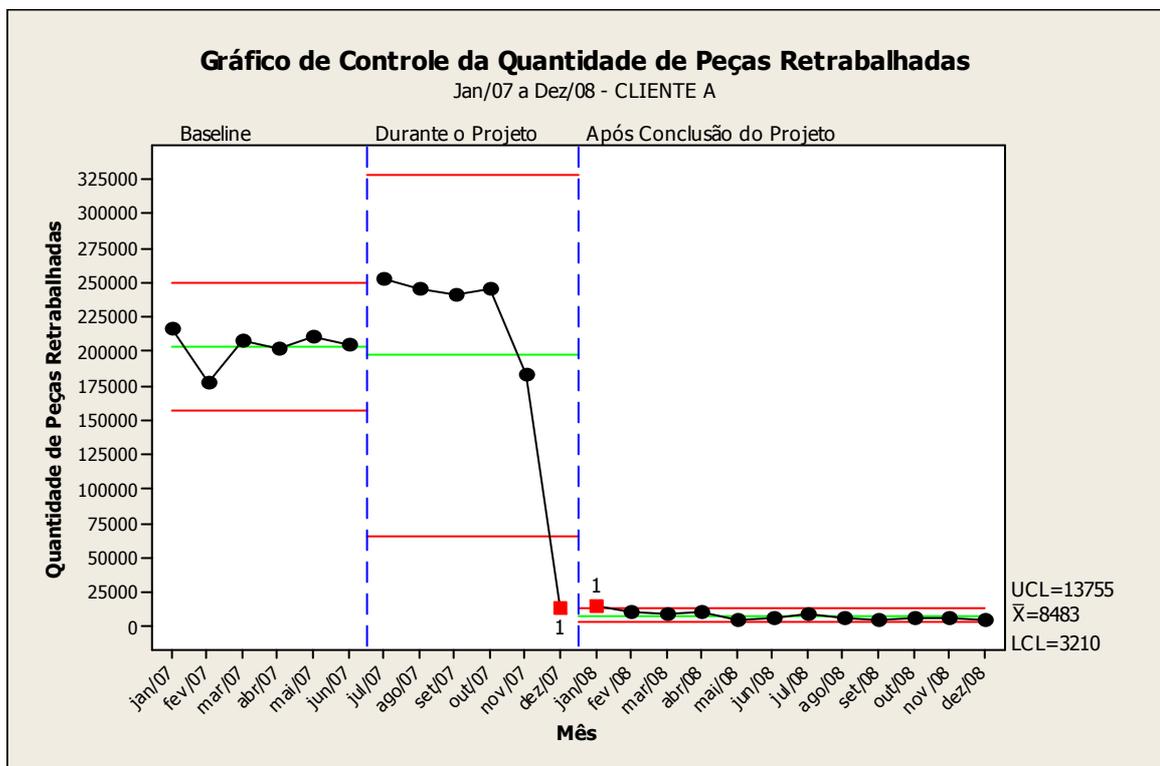
O documento de análise dos modos e efeito de falha também foi revisado e foram inseridas duas atividades de checagem no trabalho padrão do operador, sendo elas:

- *Checagem do funcionamento do ventilador no início de cada turno de trabalho:* esta é uma atividade preventiva e tem por objetivo de verificar se o ventilador está funcionando adequadamente garantindo a não deposição de cromo na face a válvula;

- *Realizar inspeção visual na face da válvula a cada 60 minutos:* esta é uma atividade de detecção e tem por objetivo detectar os defeitos de mancha e queima na face durante o processo de descarregamento das peças na saída do equipamento.

Após a identificação da causa raiz dos defeitos de mancha e queima na face gerados no processo de eletrodeposição de cromo duro e após a implementação da melhoria no sistema de exaustão, a quantidade de peças retrabalhadas devido aos defeitos em questão foi acompanhada durante 12 meses.

O gráfico de controle (Gráfico 23) mostra a quantidade de peças do cliente A retrabalhadas antes, durante e depois da implementação da melhoria no sistema de exaustão e conclusão do estudo.



**Gráfico 23:** Gráfico de controle da quantidade de peças do Cliente A retrabalhadas antes, durante e após a conclusão do projeto Seis Sigma

Como pode-se notar, houve uma redução significativa na quantidade de defeitos de mancha e queima na face após a conclusão do trabalho. Os dados coletados antes do projeto apresentavam a média de 203970 peças retrabalhadas, pode-se dizer que esta média se manteve até o mês de outubro de 2007. A partir do mês de novembro, quando as ações foram concluídas, houve uma redução sensível na quantidade de peças retrabalhadas devido aos defeitos de mancha e queima na face, e durante todo o ano de 2008 foi mantida a média de 8483 peças retrabalhadas, em outras palavras, uma redução de 96% do índice de retrabalho.

Conforme comentado anteriormente, para a remoção dos defeitos de mancha e queima é necessário realizar a operação de lixamento na face das válvulas, esta operação não constava no layout oficial do produto, fazendo com que o custo onerado por esta operação sobressalente reduzisse o lucro da empresa sobre cada peça produzida.

Ressalta-se que os valores da quantidade de válvulas retrabalhadas são referentes as válvulas do cliente A, porém as melhorias realizadas no processo impactaram todos as válvulas que passam pelo processo de eletrodeposição de cromo duro. O gráfico 24 nos mostra a evolução da quantidade de peças retrabalhadas para todas as válvulas produzidas pela empresa.

Como pode-se notar, houve uma redução significativa na quantidade de defeitos de mancha e queima na face após a conclusão do trabalho. Os dados coletados antes do projeto apresentavam uma redução de 94% do índice de retrabalho na face.

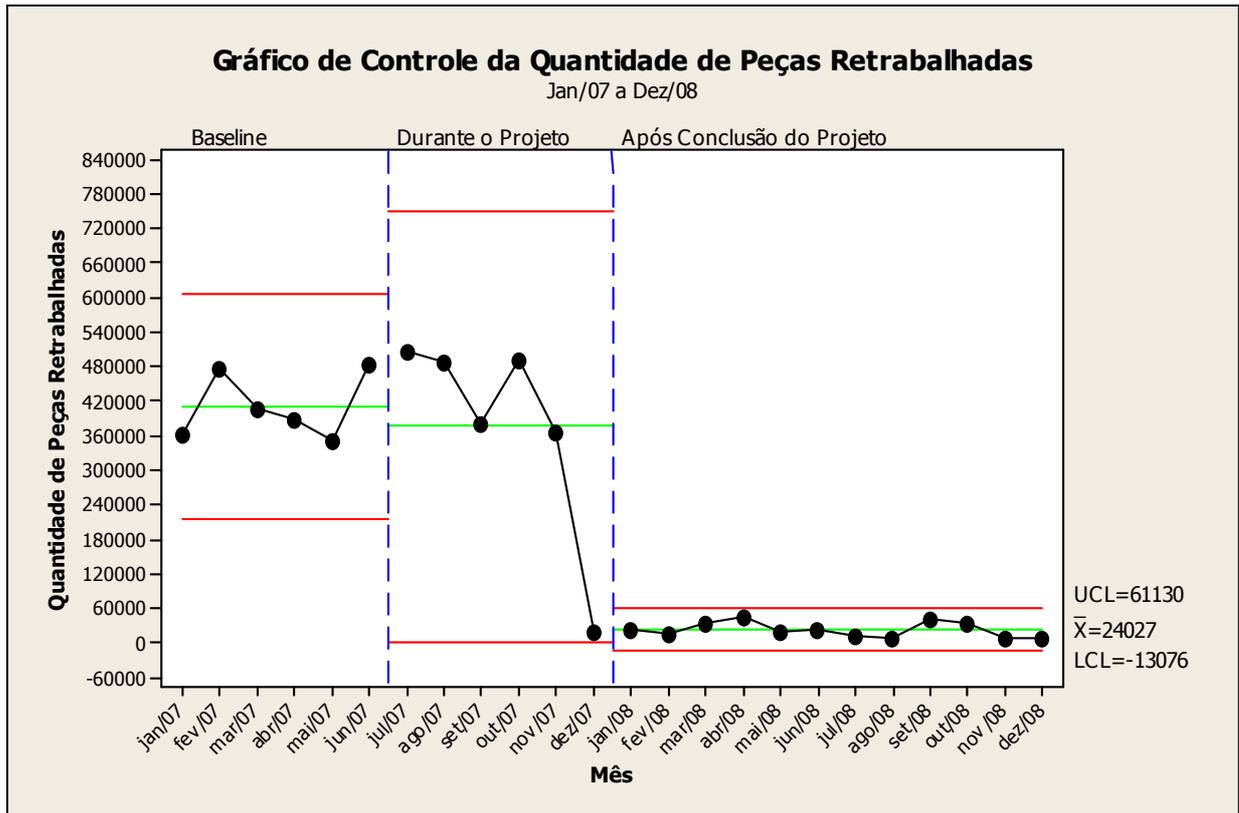
Um dos pontos que chama atenção no desenvolvimento deste projeto foi que durante a construção da matriz de Causa e Efeito, a ferramenta que direcionou todos os teste e estudos, o sistema de exaustão obteve uma baixa pontuação, sendo selecionado apenas após uma análise crítica do time sobre a matriz.

A metodologia Seis Sigma trabalha com dados para que a tomada de decisão seja assertiva e os riscos do fracasso sejam reduzidos, porém as ferramentas que direcionam os testes e estudos são subjetivas, ou seja, a elaboração do mapa de raciocínio, mapa de processo e matriz de causa e efeito dependem na sua totalidade da experiência, comprometimento e disposição do time de trabalho.

Visto que a literatura pesquisada indicou vários tipos de problemas e suas soluções nas áreas onde o cromo é depositado na peça, porém não apresentou nenhuma referencia frente a defeitos de mancha e queima em áreas não cromadas,

a participação e conhecimento das pessoas envolvidas neste trabalho tornou-se ainda mais importante.

Sendo assim, pode-se dizer que para o sucesso de qualquer projeto Seis Sigma é fundamental a seleção de um time experiente, comprometido e que esteja disposto a quebrar os paradigmas adquiridos ao longo do tempo.



**Gráfico 24:** Gráfico de controle da quantidade de peças retrabalhadas antes, durante e após a conclusão o estudo para todas as peças

## **8. Conclusão**

Neste estudo de caso foi possível constatar que através da metodologia seis sigma é possível solucionar problemas e melhorar os processos, mesmo que estes já tenham passado por diversos estudos e tentativas de melhoria.

Através da utilização da metodologia seis sigma foi possível identificar que a causa raiz dos defeitos de mancha e queima na face das válvulas é o acúmulo de cromo na face das peças durante o processo de cromação.

Várias entradas do processo foram estudadas, analisadas e debatidas e constatou-se através de testes que a ineficiência do sistema de exaustão é o principal responsável pelo acúmulo de cromo na face da válvula e a melhoria implementada para a solução do problema foi a instalação de um ventilador em um dos lados do sistema de exaustão.

É importante ressaltar que apesar da simples solução, os defeitos de mancha e queima na face das válvulas é um problema que perdura ao longo dos anos da utilização do processo de eletrodeposição de cromo duro na empresa onde o projeto foi executado e que não há referências bibliográficas sobre o assunto.

A quantidade de válvulas retrabalhadas do Cliente A foi reduzido de 203.970 para 8.483 peças por mês, o que significa uma redução de 96% do índice de retrabalho e uma economia média de R\$36.833,12 por mês.

Quando a mesma análise é feita sobre todas as válvulas produzidas pela empresa é verificada uma redução média do retrabalho de 413.016 peças para 24.027 peças por mês, o que significa uma redução de 96% para 6% do índice de retrabalho devido aos problemas de mancha e queima na face das válvulas.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, Theodore T. **Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma – Statistical Quality Control and Designs of Experiments and Systems**. Columbus: Springer, 2006. 529 p.

AMADO, R. **Análise da Aplicabilidade do Método DMAIC do Modelo Seis Sigma**. Anais do XIII SIMPEP . Bauru, 2006.

ANFAVEA. **Análises de sistemas de medição – MSA**. Manual de referência. (1o. Ed.) São Paulo: IQA, 1997.

BAKKE, H; LEITE, A; SILVA, L. **Estatística Multivariada: Aplicação da Análise Fatorial na Engenharia de Produção**. Revista Gestão Industrial: v.04, n. 04: p.01-14, 2008.

BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos**. São Paulo: Edgard Blücher, 6ª ed., 1982.

BARTILOTTI, Vanessa Farias. **O orçamento matricial e o controle de gastos fixos: Um estudo de caso em uma empresa de telecomunicações**, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado em Administração, FEAD de Minas Gerais, 2007.

BUZZONI, H. A. **Galvanoplastia: Cromação**. São Paulo: Editora Ícone LTDA, 1991. p. 67-70.

CAMPOS, V. Falconi. **Controle da Qualidade Total**. Rio de Janeiro: Bloch, 3ª edição, 1992.

CPMA – COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE. **Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização: Tipologia Galvanoplastia**. Recife: CPRH/GTZ, 2001.

DEMING, W. E. **Qualidade: A Revolução da Administração**. Rio de Janeiro: Marques Saraiva, 1990.

DEMO, Pedro. **Pesquisa e construção de conhecimento**. Rio de Janeiro: Editora Tempo Brasileiro, 1996.

DEVORE, Jay L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. Thomson: São Paulo, 2006. 692 p.

ECKES, George. **Six Sigma for Everyone**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 138 p.

ESCOFIER, B.; PAGES, J. **Análisis factorialies simples y multiples: objetctivo, métodos y interpretación**. Bilbao: Ed. Universidad del Pais Vasco, 1992.

FERREIRA, D. **Análise Multivariada**. Departamento de Ciências Exatas da Universidade Federal de Lavras, 1996.

FISHEBEIN, L. **Sources, transport and alterations of metal compounds: an overview. I arsenic, beryllium, cadmium, chromium, and nickel**. Environmental Health Perspectives 1981.

GARVIN, David A. **Gerenciando a Qualidade: A visão Estratégica e Competitiva**. Tradução de João Ferreira Bezerra de Souza. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Editora Atlas, 1999.

HARRINGTON, J. **Business process improvement workbook: documentation, analysis, design and management of business process improvement**. New York: McGraw-Hill, 1997.

HARRY, M; SCHROEDER, R. **Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing The World's Top Corporations**. New York: Currency, 2000. 320 p.

HOFF, Claudia. **Avaliação dos Resultados da Aplicação da Estratégia Seis Sigma em um Restaurante Industrial**. Dissertação submetida à Universidade de Taubaté para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2005.

ISHIKAWA, K. **Controle da Qualidade Total: À Maneira Japonesa**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Campos, 1993.

JOHSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.

KEITH M.; BOWER M. **Análise de Sistemas de Medição com Dados de Atributos**. Minitab Brasil, 2001; artigo disponível em [www.minitabbrasil.com.br](http://www.minitabbrasil.com.br). Acessado em 22/03/2009.

KLEFSJO, B.; WIKLUND, H.; EDGEMAN R. L. **Six Sigma seen as a methodology for Total Quality Management**. *Measuring Business Excellence* 5, pp. 31-35, jan. 2001.

LIMA, L. **Proposta de Metodologia para Análise da Robustez de Cadeias de Suprimentos Baseado em Taguchi, Resposta de Superfície e Simulação com Aplicação em Indústria de Eletrônicos**. Dissertação submetida à Universidade Católica do Paraná para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, 2008.

LYNCH, D. P.; BERTOLINO, S.; CLOUTIER E.T. **How to Scope DMAIC Projects**. *Quality Progress*, 36, pp. 37-41, 2003.

MAGALHÃES, Angelo R. **Aplicação do Orçamento Matricial para Redução de Custos de Terceirização em uma Empresa**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté. Taubaté: 2008.

MARTINELLI, Luiz C. **Motores de Combustão Interna**. Rio Grande do Sul: Editora Unijui, 2000.

MATOS, J.; CATEN, C. **Utilização da Metodologia Seis Sigma em Processos de Reação Química em Batelada**. Curitiba: Artigo apresentado no XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, 2002.

MEIRELES, M. **Organizações com Foco no Cliente**. São Paulo: Editora Arte e Ciência, 2001.

MONTGOMERY, D. C. **Diseño y Análisis de Experimentos**. Traduzido por Lic. Jaime Delgado Saldivar, Mexico, DF. Grupo Ed. Iberoamérica, 1991.

MORILLAS, Débora J. **Aplicação de Dissolução Anódica para Avaliação de Descontinuidades em Revestimentos de Cromo Duro**. Dissertação submetida à Universidade Federal do Paraná para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais. Curitiba, 2005.

OAKLAND, J. **Gerenciamento da Qualidade Total**. São Paulo: Livraria Nobel S.A., 1994.

OLIVEIRA, O.; PALMISANO, A.; MAÑAS, A. **Gestão da Qualidade – Tópicos Avançados**. Editora: Cengage Learning Editores, 2004.

PALADINI, Edson Pacheco. **Qualidade Total na Prática**. São Paulo: Atlas, 1ª Edição, 1994.

PALADINI, Edson Pacheco. **Qualidade Total na Prática**. São Paulo: Atlas, 2ª Edição, 1997.

PANOSSIAN, Zehbour. **Revestimentos múltiplos. Tratamento de Superfície**. São Paulo, n. 84, p. 34-55, 1997.

PEREZ-WILSON, M. **Seis Sigma – Compreendendo o Conceito, as Implicações e os Desafios**. São Paulo: Qualitymark, 1998.

PINHO, A.; LEAL F.; MONTEVECHI, J.; ALMEIDA, D. **Combinação entre as Técnicas de Fluxograma e Mapa de Processo no Mapeamento de um Processo Produtivo**. Artigo apresentado no XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007.

PYZEDEK, THOMAS. **The Six Sigma Handbook – A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels**. New York: McGraw-Hill, 2003

RAMM, A. **Procedimento de calibração e otimização estrutural para gabinete de refrigerador**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2007.

RAMPASSO, Celina A. **Diagnóstico e Proposição da Implantação de um Sistema de Gestão da Qualidade em uma Pequena Empresa**. Dissertação submetida à Universidade de Campinas para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2006.

REIS, M. **Um Modelo para o Ensino do Controle Estatístico da Qualidade**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção. Florianópolis, 2001.

Dissertação submetida à Universidade de Campinas para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2006.

RIBEIRO, J.L.D.; ECHEVESTE, M.E. & DANILEVICZ, A. M.F. **A utilização de QFD na otimização de produtos, processos e serviços**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

RODRIGUES, Marcus V. **Uma Investigação da Qualidade nas Organizações Brasileiras**. Artigo publicado originalmente na Revista Brasileira de Administração Contemporânea, Anpad, vol. I, nº 9, 1995.

ROTONDARO, Roberto G. **Seis Sigma – Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

SEBRAE – MG. **Ponto de Partida: Galvanoplastia**. Centro de Resposta Técnica do Sebrae de Minas Gerais, 2005.

SILMAN, H. **Acabado Químico y Galvanoplástico de los Metales: Cromado**. Barcelona: Escuela Pías, 1955.

SILVA, E.; Menezes, E. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SILVA, João A. **Estudo da Relação entre as Concentrações Ambientais das Névoas de Ácido Crômico em Processo de Eletrodeposição de Cromo Duro e a Eficácia de Três Diferentes Sistemas de Proteção Coletiva**. Dissertação de Mestrado em Saúde Ambiental da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2001.

SILVA, M. **Um Modelo Matemático para Estudo de Otimização do Consumo de Energia Elétrica**. Dissertação submetida à Universidade Estadual Paulista para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, 2007.

SILVA, R. F. **A Importância dos Estudos de MSA nas Organizações**. Qqualypro 2007; artigo disponível em [www.qualypro.com.br/estudos](http://www.qualypro.com.br/estudos). Acessado em 15/07/2009.

SILVA, W. **Experiência na Implantação da Rotina de Análise de Sistemas de Medição em uma Indústria de Auto Peças**. Revista de Educação Tecnológica. Vol. 7, 17-22p., 2002

SINDIDUPER/ABTS. **A História da Galvanoplastia no Brasil**. São Paulo: Andreato Comunicação & Cultura, 2006.

SOLIMAN, F. **Optimum level of process mapping and least cost business process re-engineering**. International Journal of Operations Production Management, p.810-816, 1999.

STAMATIS, Dean H. **Six Sigma Fundamentals: A Complete Guide to the System, Methods and Tools**. New York: Productivity Press, 2004. 350 p.

SURTEC. **Tratamentos de superfícies**. Organizado, atualizado e revisado por Roberto Motta de Sillos. 2ª ed. São Bernardo do Campo, SP : SurTec do Brasil, 2006.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa ação**. 14. Ed. São Paulo: Editora Cortez, 2007.

TORRES, N.; HADDAD, E.; ONO, R. **Análise de Regressão**. Departamento de Tecnologia da Universidade de São Paulo, 2009.

VERGARA, S. C. **Métodos de Pesquisa em Administração**. São Paulo: Editora Atlas, 2005.

WEBSTER, Marcelo F. **Um Modelo de Melhoria Contínua Aplicado à Redução de Riscos no Ambiente de Trabalho**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, 2001.

WEINER, R. E. **Galvanotécnica Prática: Metais depositados galvanicamente**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1973.

WERKEMA, C. **Criando a Cultura Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

ZAKI, NABIL. **Chromium Plating**. Artigo disponível no site: [www.pfonline.com](http://www.pfonline.com). Acessado em Setembro de 2009.

ZAKI, NABIL. **Troubleshooting Hexavalent Chromium Plating**. Artigo disponível no site: [www.pfonline.com](http://www.pfonline.com). Acessado em Outubro de 2009.

ZACHARIAS, Oceano. **ISO 9000:2000 Conhecendo e Implementando**. São Paulo: O. J. Zacharias, 2001.