

# APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA REDUÇÃO DE DEFEITOS NA FACE DE VÁLVULAS DE ADMISSÃO E ESCAPE

**Flávio Bonafé Oliveira**<sup>1</sup> (flavio\_bonafe@yahoo.com.br)

**Álvaro Azevedo Cardoso**<sup>1</sup> (azevedo@unitau.br)

**Carlos Alberto Chaves**<sup>1</sup> (chaves@unitau.br)

**Valesca Alves Correa**<sup>1</sup> (valesca@unitau.br)

**José Rui Camargo**<sup>1</sup> (rui@unitau.br)

<sup>1</sup>UNITAU - Engenharia Mecânica, R. Daniel Danelli, s/n, Jardim Morumbi, 12060-440, Taubaté/SP

**Resumo.** Esta pesquisa tem por 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. Como resultado da aplicação da metodologia Seis Sigma constatou-se que os defeitos acontecem devido ao depósito de cromo na face da válvula durante a etapa de eletrodeposição de cromo duro. A quantidade de válvulas retrabalhadas pela empresa constata uma redução de 96% para 6% devido aos problemas constatados

**Palavras-Chave:** eletrodeposição de cromo duro, qualidade, seis sigma.

## 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.

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.

A empresa onde foi aplicada a metodologia Seis Sigma 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 tempo, a eletrodeposição de cromo duro se tornou um sério problema devido aos defeitos de mancha e queima na face das válvulas. Para estas válvulas era necessário realizar uma operação de lixamento na face das válvulas para a remoção das manchas e queimas. A operação de lixamento não constava no layout oficial do produto, fazendo com que o custo por esta operação sobressalente reduzisse o lucro da empresa sobre cada peça produzida.

O objetivo da pesquisa é aplicar a metodologia Seis Sigma para a redução dos defeitos de mancha e queima na face das válvulas, gerado no processo de eletrodeposição de cromo duro na haste, reduzindo assim o retrabalho de lixamento da face das válvulas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. 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 tratamos 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 sistemático, 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.

### 2.2. DMAIC

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 Definir, Medir, Analisar, Melhorar (Improve) e Controlar. Este trabalho estará restrito ao desdobramento do DMAIC, pois o estudo de caso apresentado se trata da melhoria de um processo já existente. 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”. 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.

### 2.3. Válvulas Automotivas

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. 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. As válvulas de escape permitem a saída dos gases provenientes da combustão interna do 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 700oC até 850oC); 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 o acionamento das mesmas.

## 2.4. O processo de Eletrodeposição de Cromo Duro

O cromo é um metal não-nobre, apresenta um potencial de equilíbrio padrão relativamente baixo, 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).

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.

Atualmente, 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, que deve ser mantido em torno de 100:1.

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, 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.

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.

O funcionamento do revestimento de cromo duro é produzido pela solução de ácido crômico, o qual contém um ou mais ânions catalíticos.

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. 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 (Panossian, 1997).

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Tipo de Pesquisa

Conforme Cervo e Bervian (2002), a pesquisa quanto à sua natureza, é um trabalho aplicado, ou seja, tem os conhecimentos gerados aplicáveis em um problema prático. Quanto ao objetivo, este pode ser classificado como exploratório, a partir da exploração da utilização da metodologia Six 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. Em relação aos procedimentos técnicos, esta é uma pesquisa, pois o problema investigado está diretamente relacionado com os pesquisadores.

### 3.2. 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 de descarregamento das peças no equipamento são feitos 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.

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. O operador é responsável em receber as peças, carregar o equipamento com as peças não cromadas e descarregar as peças cromadas nos respectivos contetores.

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.

Na 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 promovemos a eletrólise da solução.

A segunda lavagem com água tem o objetivo de remover o excesso de acido crômico carregado junto à válvula. Após a lavagem as peças cromadas são descarregadas manualmente do equipamento.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Linha de Base

Após acompanhamento do processo e levantamento de dados, foi constatado que em média estava ocorrendo um número elevado de peças retrabalhadas por mês. A Fig. (1) 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.

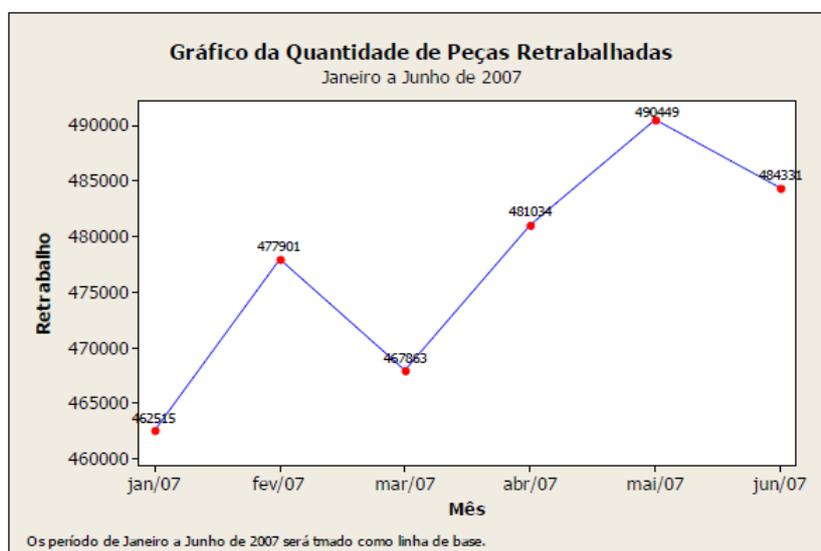


Figura 1. Gráfico da quantidade de peças retrabalhadas no período entre janeiro e junho de 2007.

### 4.2. Identificação da Fase do Processo onde Surgem as Manchas e Queimas

Decidiu-se estudar 500 peças para se localizar o surgimento das manchas e queimas na face da válvula ao longo do processo de cromação. Sendo assim, as 500 peças foram analisadas antes de serem carregadas, após o processo de desengraxe, após o processo de lavagem I, após o processo de pré-cromo, após o processo de cromo e após o processo de lavagem com água II. Os resultados são mostrados na

Tab. (1). A tabela indica 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.

Tabela 1. 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                        |

#### 4.3. 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 de 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. A Matriz de Causa e Efeito apresentada na Fig. (2), contribui na priorização das principais variáveis de entrada levantadas no mapeamento do processo. Definiu-se 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. Sendo assim, neste estudo de caso, quatro variáveis foram selecionadas através da classificação do valor de Impacto Total e outras três foram selecionadas através da análise crítica. As variáveis de entradas selecionadas foram Características da válvula, Cromo na superfície da válvula, Parâmetros do processo, Temperatura da válvula, Tipo de gancheira, Sistema de exaustão e Comprimento cromado.

| Matriz de Cause e Efeito         |                                |  |                      |                |   |               |
|----------------------------------|--------------------------------|--|----------------------|----------------|---|---------------|
| Índice de Importância ao Cliente |                                |  | Saídas               |                |   | Impacto Total |
|                                  |                                |  | Queima na face       | Mancha na Face |   |               |
|                                  |                                |  | 10                   | 8              | 3 |               |
|                                  |                                |  | 1                    | 2              | 3 |               |
| 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 2. Matriz de Causa e Efeito.

#### 4.4. Sistema de Exaustão

Todas as variáveis Características da válvula, Cromo na superfície da válvula, Parâmetros do processo, Temperatura da válvula, Tipo de gancheira, Sistema de exaustão e Comprimento cromado foram estudadas.

Todas as avaliações indicaram que os defeitos acontecem devido ao acúmulo de cromo na face da válvula, porém notou-se que na mudança do local do contato na 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. A observação deste fato direcionou estudos sobre o sistema de exaustão do equipamento de eletrodeposição de cromo duro, visto que este fator também estava indicado na matriz da causa e efeito.

Durante o teste do Sistema de Exaustão, avaliou-se 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>, que é liberado na forma gasosa e 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.

Decidiu-se colocar um ventilador em um dos lados da tubulação central do sistema de exaustão do equipamento. Com a instalação deste ventilador, foi perceptível uma melhora significativa do fluxo da nuvem de hidrogênio mais 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 10.000 válvulas e os resultados desta análise são mostrados na Fig. (3), onde se tem uma comparação dos dados antes e depois da instalação do ventilador na tubulação central do sistema de exaustão. A figura indica o índice de peças defeituosas levando em consideração a soma dos defeitos de mancha e queima na face da válvula. A porcentagem das manchas e queimas na face caiu de 96% para 6%. 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.

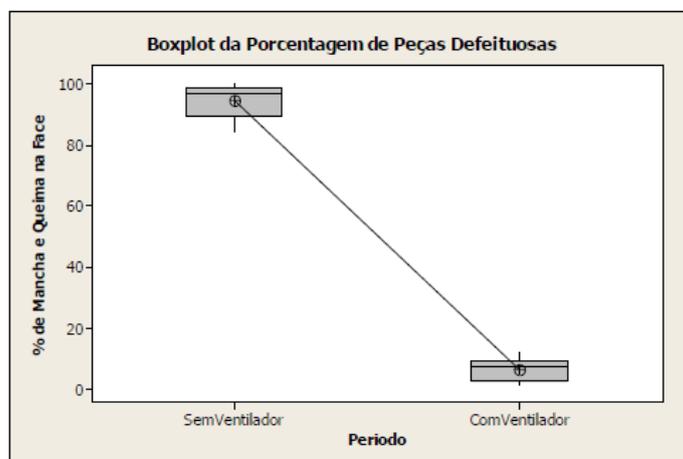


Figura 3. Boxplot da porcentagem de peças defeituosas antes e depois da instalação do ventilador na tubulação central do sistema de exaustão.

A Figura (4) indica as melhorias realizadas no processo de eletrodeposição de cromo duro, observando-se a evolução da quantidade de peças retrabalhadas para todas as válvulas produzidas pela empresa. Observa-se uma redução significativa na quantidade de defeitos de mancha e queima na face da válvula. Os dados coletados indicam uma redução de 96% do índice de retrabalho na face.

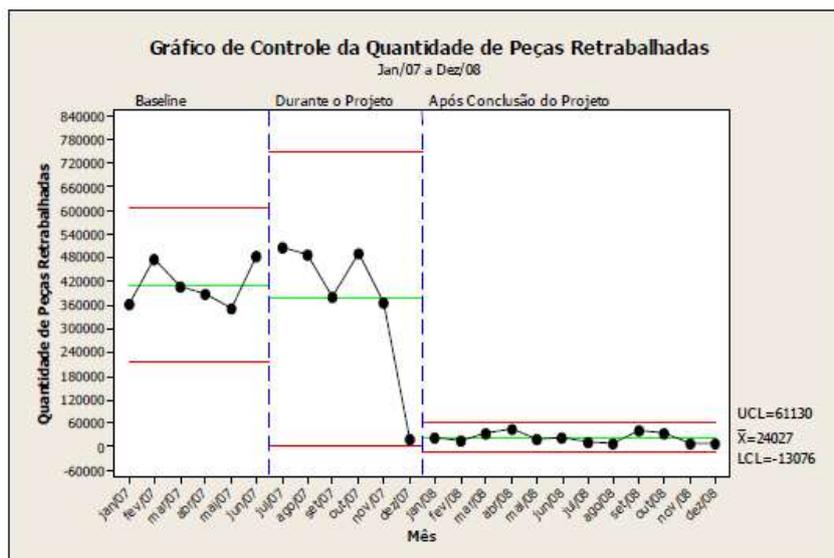


Figura 4. Gráfico de controle da quantidade de peças retrabalhadas antes, durante e após a utilização da Metodologia Seis Sigma para todas as peças.

## 5. CONCLUSÕES

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.

A quantidade de válvulas retrabalhadas reduziu de 96% para 6% devido aos problemas de mancha e queima na face das válvulas.

## 6. REFERÊNCIAS

- Allen, T. T. (2006) Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma – Statistical Quality Control and Designs of Experiments and Systems. Columbus: Springer.
- Cervo A. L., Bervian, P. A. (2002) Metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall.
- Klefsjo B., Wiklund H., Edgeman R. L. (2001) Six Sigma seen as a methodology for total quality management. Measuring Business Excellence 5, p. 31-55.
- Lynch D. P., Bertolino S., Cloutier E. T. (2003) How to Scope DMAIC Projects. Quality Progress, 36, pp. 37-41.
- Martinelli L. C. (2000) Motores de Combustão Interna. Rio Grande do Sul: Editora Unijui, 182 p.
- Panossian Z. (1997) Revestimentos múltiplos. Tratamento de Superfície. São Paulo, n. 84, p. 34-55.
- Stamatis D. H. (2004) Six Sigma Fundamentals: A Complete Guide to the System, Methods and Tools. New York: Productivity Press, 350 p.

## DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.