



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO

**PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS VIA MÉTODO
TAGUCHI: UMA APLICAÇÃO NO PROCESSO DE CROMAÇÃO DE ANÉIS**

Rita C. R. Ferreira
João R. C. Siqueira

Orientador: Pedro Paulo Balestrassi

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção
Cx. P. 50 – 37500-000 – Itajubá, MG, Brasil – pedro@iem.efei.br

***Resumo.** Cada vez mais as empresas vêm empregando metodologias de caráter científico para atingir seus objetivos de crescimento. Um exemplo é a Filosofia Seis Sigma, que propõe que se faça a coisa certa mais rápido, melhor e mais eficientemente que os concorrentes. O objetivo deste trabalho é a melhoria da qualidade e conseqüentemente a satisfação do cliente, aumentando os rendimentos do processo chamado Cromação da Mahle Cofap Anéis S/A, fabricante de anéis para motores de combustão interna. A melhoria do processo se dará através de Planejamento e Otimização de Experimentos, com base na ferramenta estatística Método Taguchi. Este Método é uma das ferramentas usadas principalmente na fase Melhorar do modelo para melhoria de performance DMAIC, que é o método estruturado para atingir as metas na filosofia Seis Sigma. Aborda-se uma aplicação de otimização das variáveis envolvidas, no intuito de aproximar ao máximo possível do valor nominal da variável saída denominada espessura de cromo. O não atendimento desta especificação leva ao retrabalho, causando prejuízos para a empresa. Um exemplo específico de anel valida a eficácia da ferramenta em caracterizar a importância da melhor combinação entre as principais variáveis e, em posse da metodologia, aplicá-la em outros processos, chegando a um nível desejado de garantia da qualidade do produto.*

***Palavras-chave:** Taguchi, Seis Sigma, Anéis*

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 A filosofia Seis Sigma e o método Taguchi

A filosofia Seis Sigma é uma estratégia gerencial disciplinada e altamente quantitativa que tem como objetivo aumentar drasticamente a lucratividade das empresas por meio da melhoria da qualidade de produtos e processos e do aumento da satisfação de clientes e consumidores (Werkema, C., 2000, *Estratégia para aumentar a lucratividade*, Banas Qualidade, Dez., pp. 138-143).

O entendimento da filosofia Seis Sigma pode ser facilitado se for feita uma comparação entre o padrão atual, no qual grande parte das empresas vem operando e a *performance* Seis Sigma. Os benefícios resultantes são traduzidos para a linguagem financeira.

A filosofia nasceu na Motorola em 1987, com o objetivo de tornar a empresa capaz de enfrentar os concorrentes estrangeiros, que estavam fabricando produtos de melhor qualidade e a um custo mais baixo. Depois que a Motorola recebeu o Prêmio Nacional da Qualidade Malcolm Baldrige em 1988, o Seis Sigma passou a ser conhecido como o programa responsável pelo sucesso alcançado pela empresa. A partir da divulgação do sucesso da Motorola, outras empresas como Asea Brown Boveri, Allied Signal, General Electric e Sony passaram a utilizar o Seis Sigma.

No Brasil, o interesse pela filosofia Seis Sigma também está crescendo a cada dia. Já a alguns anos, as empresas cujas unidades de negócio no exterior estavam implementando o programa a conheceram (Werkema, C., 2000, *Estratégia para aumentar a lucratividade*, Banas Qualidade, Dez., pp. 138-143). O pioneiro na implementação do Seis Sigma com tecnologia nacional foi o Grupo Brasmotor, seguido por empresas como AmBev, Belgo Mineira, Votorantim, Alcan, Politen, Johnson & Johnson, entre outras.

São usadas ferramentas estatísticas conhecidas na busca da eliminação de defeitos ao longo de todos os processos da empresa. No entanto, sua abordagem e forma de implementação são únicas e realmente trazem benefícios, o que explica o sucesso do programa.

Os principais elementos responsáveis pelo sucesso do Seis Sigma são a mensuração direta dos benefícios do programa pelo aumento da lucratividade da empresa, o elevado comprometimento da alta administração e o modelo para Melhoria de Performance DMAIC, que é o método estruturado para atingir as metas no Seis Sigma.

Outros aspectos importantes para o sucesso do Seis Sigma são o foco na satisfação do consumidor (a partir das características críticas para a qualidade ou CTQs – Critical to Quality, a busca contínua da redução da variabilidade, a adaptação para o projeto de produtos e processos e a aplicação efetiva a processos administrativos de serviços ou de transações e não somente a processos técnicos.

O modelo para Melhoria de Performance DMAIC é constituído por cinco fases:

Definir (*Define*)

Medir (*Measure*)

Analisar (*Analyse*)

Melhorar (*Improve*) e

Controlar (*Control*).

Diversas ferramentas são utilizadas de maneira integrada às fases do DMAIC, que se transformam então num método sistemático baseado em dados e no uso de ferramentas estatísticas para se atingir os resultados buscados pela empresa. O Método Taguchi é uma destas ferramentas, usada principalmente na fase Melhorar (*Improve*).

Dr. Genichi Taguchi foi quem propôs o Método Taguchi, que é um método para planejamento de produtos ou processos e cujo foco está na minimização da variação e/ou sensibilidade para ruído. Quando usado corretamente, trata-se de um poderoso e eficiente método para planejamento de produtos ou processos que operam sobre uma variedade de condições.

1.2 Idéias Centrais de Taguchi

Controle robusto. É uma importante metodologia para o controle da estabilidade de processos e produtos, principalmente de manufatura.

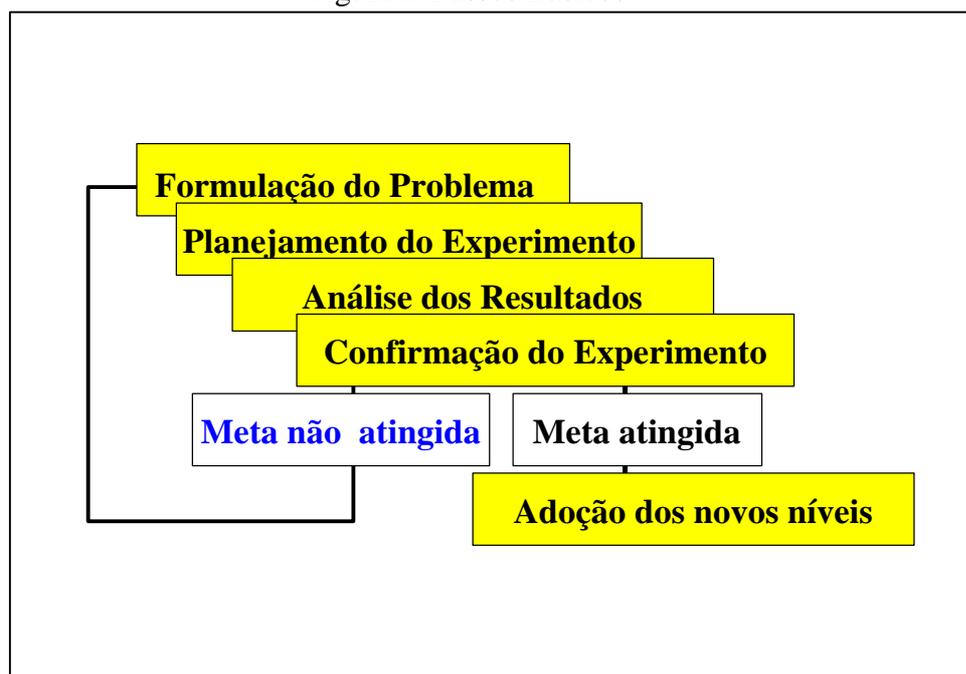
Sua idéia central é de que a variabilidade no desempenho de um produto resulta em perda de qualidade e em perda monetária para a sociedade.

Fontes de Variação. Podem ser Controláveis (arranjo interno), como por exemplo *set-up*, matéria-prima, etc ou Incontroláveis (arranjo externo ou ruído), como por exemplo variáveis ambientais, deterioração, desgaste, imperfeições, etc. São de difícil eliminação.

Controle de Qualidade Off-Line. Tem como objetivos reduzir a variação, reduzindo a sensibilidade do produto a certas fontes de variação ao invés de controlar essas fontes, e também de selecionar apropriados níveis para parâmetros controláveis.

Passos Básicos. A Metodologia de Taguchi para implementar a idéia do controle robusto consiste basicamente dos seguintes passos: formulação do problema, planejamento do experimento, análise dos resultados e confirmação do experimento (se a meta for atingida, adotar os novos níveis. Se a meta não for atingida, voltar na formulação do problema), como mostra a figura 1 (Balestrassi, P. P., EFEI, M823, 2001).

Figura 1. Passos Básicos



Formulação do problema. A formulação do problema envolve as seguintes etapas: determinar as características da resposta: Menor melhor, Maior melhor, Nominal melhor; listar as variáveis que afetam a resposta do produto (ou processo) e classificá-las em controláveis ou incontroláveis. listar os pares de fatores cuja interação podem potencialmente afetar na característica de resposta; decidir sobre os níveis de cada fator. Usualmente dois níveis por variável resulta em um número menor de experimentos mas algumas características podem ser sacrificadas, como por exemplo a monotonicidade da resposta.

Planejamento do experimento. Este passo envolve duas fases, que são o projeto da Matriz do Experimento e a Condução dos Experimentos juntamente com a Coleta de Dados. No Projeto da Matriz do Experimento dá-se o Uso de Arranjos Ortogonais (estudo de vários fatores simultaneamente, com número reduzido de experimentos e de fácil análise).

Análise dos resultados. A análise dos resultados pode ser de dois tipos: análise da Média: Definição dos níveis ótimos dos fatores em termos de desempenho; análise da Variância: Determinação da importância relativa dos vários fatores e avaliação do erro.

Experimento de confirmação. A finalidade nesse estágio do projeto é verificar se as condições ótimas sugeridas realmente são melhorias.

Se essas novas condições não oferecem melhorias, deve-se concluir que o modelo aditivo adotado não é bom. Alguns recursos devem ser ainda tentados: encontrar uma melhor função Sinal Ruído (S/R); rever os fatores, níveis e arranjos; considerar interações entre os fatores.

2. APLICAÇÃO: PROCESSO DE CROMAÇÃO

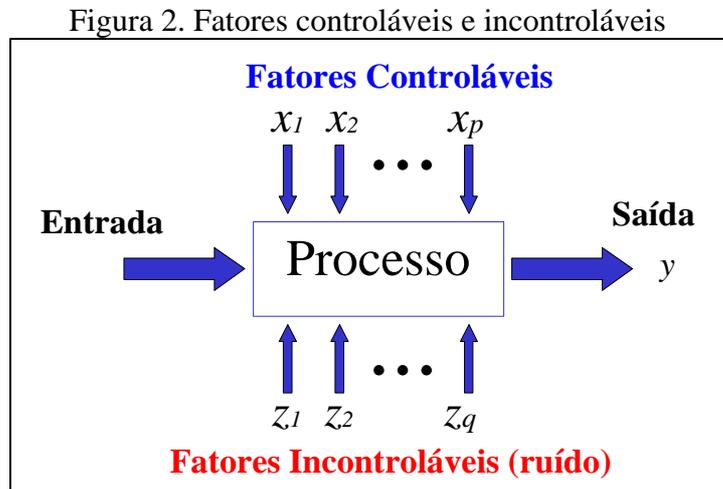
Com a devida autorização da Empresa Mahle Cofap Anéis S/A de Itajubá – MG, foi abordado o problema de camada de cromo fora da especificação, durante o processo de Cromação em anéis. Serão seguidos os passos abordados no item 2.2: formulação do problema, escolha das variáveis e níveis, seleção da variável resposta, execução do experimento e coleta dos dados, análise estatística dos dados e resultados e discussões.

Formulação do problema. Existe uma espessura desejada para a camada de Cromo, com uma faixa de tolerância para melhores resultados, e o não atendimento desta especificação causa perda do processo.

Especificamente para esta experiência, adotou-se o Anel 20674.00, produzido em grande escala pela empresa.

Escolha das variáveis e níveis.

A figura 2 abaixo mostra que num processo, existem fatores controláveis e incontroláveis (Balestrassi, P. P., EFEI, M823, 2001).



No intuito de proporcionar maior confiabilidade, escolheu-se as variáveis juntamente com pessoas da área de Cromação da empresa, a fim de se conseguir uma melhoria que fosse do interesse de todos.

As variáveis controláveis para o experimento em questão são o tempo de cromação, a temperatura de cromação e a densidade de corrente (A/dm^2).

As variáveis incontroláveis são a relação de banho e distância entre pólos.

Seleção da Variável Resposta. A variável resposta é a espessura da camada de cromo. A espessura desejada nominal é de 22 micrômetros = 0,022 mm.

A faixa para melhores resultados proposta no planejamento é de 22 a 23 micrometros.

Trata-se então um problema do tipo Nominal é Melhor.

Execução do experimento e coleta de dados.

As variáveis controláveis foram usadas nas seguintes faixas, retiradas de normas preestabelecidas pela engenharia da empresa para este tipo de anel:

Tempo de Cromação	: 195 e 225 minutos
Densidade de Corrente	: 53 e 66 A/dm^2
Temperatura de Cromação	: 57 e 63° C

As incontroláveis foram classificadas, que são genéricas para todos os anéis, em:

Relação de Banho	: Baixa e Alta
Distância entre Pólos	: Centrada e Não-Centrada

Análise estatística dos dados. Para a análise estatística dos dados utilizou-se o software MINITAB, que variou todas as condições, gerando diversos experimentos, de onde pode-se chegar ao melhor resultado. Dentro deste programa, fez-se uso da ferramenta Taguchi.

Resultados e discussões. Após terem sido realizados os experimentos, partiu-se para a parte de análise dos dados obtidos. Os gráficos abaixo, fornecidos pelo software MiniTab, mostram o comportamento das variáveis.

Além do já mencionado anteriormente, deve-se fazer uma análise de como a variável resposta varia em relação aos fatores controláveis, sendo duas as possibilidades:

- de maneira crescente, ou seja, o aumento do fator controlável implica em aumento da variável resposta;
- de maneira decrescente, ou seja, o aumento do fator controlável implica em diminuição da variável resposta.

Gráfico 1. Efeitos principais, com base na média, plotados pelo programa

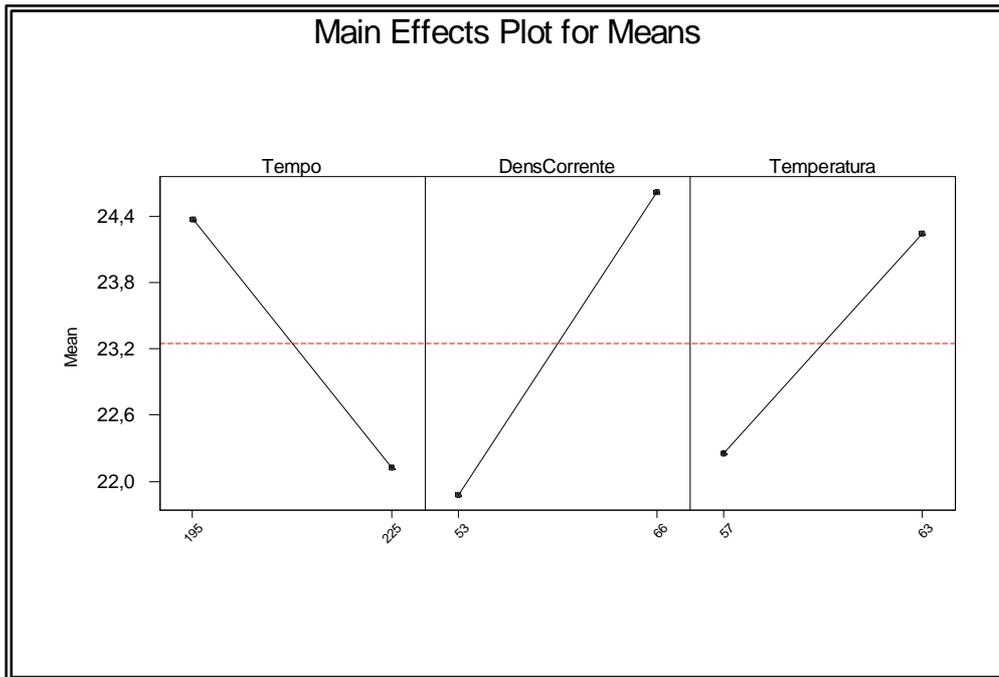
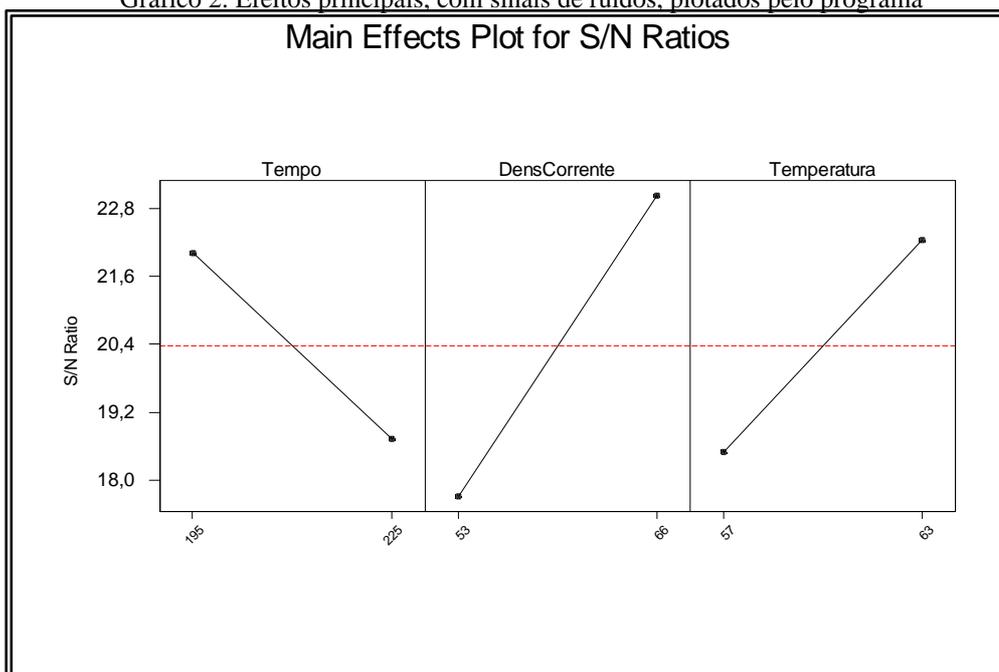


Gráfico 2. Efeitos principais, com sinais de ruídos, plotados pelo programa



Para a geração dos gráficos acima, assim como para chegar à resposta, entrou-se com os limites citados anteriormente para cada variável, e o programa formou a seguinte combinação:

Tabela 1. Dados de combinações e resultados;

Tempo	Dens. Corrente	Temperatura	Relação de Banho	Distancia	Espessura 1	Espessura 2
195	53	57	Baixa	Centrada	25	24
195	53	57	Alta	Centrada	20	19
195	66	63	Baixa	Nao Centrada	27	25
195	66	63	Alta	Centrada	27	28
225	53	63	Alta	Nao Centrada	25	23
225	53	63	Alta	Nao Centrada	20	19
225	66	57	Baixa	Nao Centrada	20	21
225	66	57	Baixa	Centrada	24	25

Por estes, chegou-se aos dados abaixo de resposta:

Tabela 2. Dados resposta pela Média;

Tabela de Resultados pela Média			
Nível	Tempo	Dens. Corrente	Temperatura
1	24,375	21,875	22,250
2	22,125	24,625	24,250
Delta	2,250	2,750	2,000
Classificação	2	1	3

Tabela 3. Dados resposta pela Taxa de Ruídos de Sinais;

Tabela de Resultados pela Taxa de Sinais/Ruídos			
Valor Nominal melhor ($10 \times \log_{10}(\hat{i}^2 / \hat{\sigma}^2)$)			
Nível	Tempo	Dens. Corrente	Temperatura
1	22,01	17,7103	18,4902
2	18,731	23,0306	22,2507
Delta	3,2799	5,3203	3,7605
Classificação	3	1	2

Conclusão através dos Resultados. Com estes resultados, tendo em vista o objetivo de se chegar o mais próximo possível do resultado nominal e levando em consideração a robustez do sistema, pode-se dizer que a melhor combinação para tal análise é a seguinte:

- Tempo de 195 (*Level 1*)
- Densidade de Corrente de 66 (*Level 2*)

- Temperatura de 63 (*Level 2*)

Conclui-se também que a ordem dos fatores que mais afetam a média, pela tabela 02, é a densidade de corrente, o tempo e a temperatura. Já pela tabela 3, pode-se notar os fatores que apresentam maiores robustez para com o sistema, ou seja, quando ocorrerem certas variações no processo, sinais/*ruídos*, a ordem de significância seria densidade, temperatura e tempo.

Considerando que tal processo possui tais variáveis incontroláveis constantemente, e que estas causam turbulências no decorrer da cromação em si, pode dizer que a melhor função encontrada é a de Sinal/Ruído, nos dando maior certeza do resultado. Portanto, analisando por este ângulo e em conjunto com a equipe da Cromação, nota-se que a melhor ordem de importância para tal experimento seria a de densidade de corrente, temperatura e tempo.

Assim, a variável mais importante do processo analisado é a densidade de corrente, exigindo maior atenção e controle. Este resultado tornou o trabalho agora mais preciso em suas necessidades, pois antes acreditava-se que para a variável resposta espessura de cromo, o controle do tempo seria o mais importante. Tal resposta será levada à equipe de Cromação, discutida e analisada, a fim de verificar sua eficácia e implantar estudos de melhoria no controle da intensidade de corrente, com a qual calcula-se a densidade de corrente.

REFERÊNCIAS

- Forrest W. B., Implementing Six Sigma, John Wiley & Sons, Inc.
- Neto, B. B. & Scarminio, S I., 1995, Planejamento e Otimização de Experimentos, Editora Unicamp, Segunda Edição.
- Werkema, C., 2000, Estratégia para aumentar a lucratividade, Banas Qualidade, Dez., pp. 138-143.
- Balestrassi, P. P., EFEI, M823, 2001.

PLANNING AND OPTIMIZATION OF EXPERIMENTS THROUGH TAGUCHI'S METHOD

Summary. In the success companies, the importance of being always growing and improving is the first business rule. The success key is doing the right thing faster, better and more efficiently than the competitors. It's the goal of this work: bring results, quality, improvement and customer satisfaction, increasing the profits in the process area called Cromação of Mahle Cofap Anéis S/A, manufacturer of rings for internal combustion engine. The focus is the improvement phase, through the Planning and Optimization of Experiments, based on statistical tool called Taguchi Method. It will be approached a practical application of optimization of the involved variables with the objective to approximate to the nominal value of this outlet variable called chrome's thickness. The non-attainment of the specification causes the process repetition, bringing damages to the company. So, through a specific example of ring, it's possible to show the tool's efficacy to characterize the importance of the best combination between the main variables and, with the methodology, make the application in more process arriving to a wished level of guaranty of product quality.

Word-key. Taguchi, Six Sigma, Rings.