

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS NO PROCESSO PRODUTIVO

Jorge Alexander Sosa Cardoza (1); Edvaldo Amaro Santos Correia (2)

(1) CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO AMAZONAS – UNIDADE DE ENSINO DESCENTRALIZADA DE MANAUS - CEFET-AM-UNED-MANAUS; UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS-UEA; UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS-UFAM. Caixa postal Nº 961, CEP: 69011-970, Manaus – Amazonas – BRASIL, (92)3613-3531, jcardoza@cefetam.edu.br.

(2) CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE PERNAMBUCO - CEFET-PE; UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS-UFAM, edquimica@ig.com.br.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver experimentos na linha de produção, baseado nas ferramentas convencionais da qualidade e no método TAGUCHI. O estudo de caso foi realizado na linha de injeção plástica da empresa COMPAZ Componentes da Amazônia.S. A., instalada no Parque Industrial de Manaus - PIM - Amazonas - Brasil. O problema estudado se refere às manchas observadas sobre a superfície dos gabinetes de plástico dos televisores, os fatores de maior significância foram: matéria-prima utilizada, montagem na linha e tinta aplicada. Experimentos foram planejados e executados, o arranjo ortogonal empregado foi o L8, proposto por Taguchi. As medições das áreas das manchas obtidas foram analisadas através da técnica de análise de variância, as variáveis mais significativas para o problema foram determinadas, tais como: matéria-prima virgem e reciclada; montagem com uso de luva e sem luva; e tinta diluída e concentrada. O estudo do problema foi caracterizado através das áreas das manchas, as análises físico-químicas das mesmas determinaram contaminação no substrato por traços de metais, confirmando o mesmo resultado determinado com o método Taguchi.

Palavras-Chave: Transformação de Termoplásticos, Método Taguchi, Solução de problemas, Estatística na Produção, Planejamento de Experimentos.

1. INTRODUÇÃO

O Pólo Industrial de Manaus – PIM.

Segundo a Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA (2007), em Manaus estão instaladas as mais importantes indústrias nacionais e multinacionais. Empresas que ao longo dos últimos 40 anos estão se aprimorando, acompanhando as mudanças econômicas e que hoje fazem do Pólo Industrial de Manaus uma referência para a indústria brasileira e internacional. As mais de 430 empresas instaladas em Manaus possuem elevados índices de inovação tecnológica, competitividade e produtividade. Apresentou faturamento médio no ano de 2006 de aproximadamente US\$ 22,8 bilhões e geração de 98 mil empregos diretos.

Aplicabilidade Industrial.

Para assegurar a qualidade dos produtos produzidos pelo Pólo Industrial de Manaus torna-se necessário o conhecimento de diversas ferramentas e métodos no controle do processo produtivo. Além dos métodos de planejamento de experimentos convencionais, destaque-se o de TAGUCHI por sua organização e diminuição das experiências, que pode ser utilizado nos diversos segmentos produtivos, tais como eletroeletrônico, automotivo, químico, petrolífero, aeronáutico, telecomunicações, Informática, mecatrônica e gestão empresarial. Como pode ser apreciado no trabalho de Maltez (2006), Greco (2004) e Faxina (2006).

A empresa COMPAZ - Componentes da Amazônia S. A., realizou estudo de desempenho em sua linha de produção, detectando não conformidades na superfície de peças injetadas com poliestireno de alto impacto. Para resolver o problema foi proposta uma metodologia com o objetivo de isolar, identificar as causas e propor soluções.

Planejamento do problema.

O presente trabalho busca estudar o problema encontrado na linha de produção, identificar os fatores envolvidos, filtrando-os e estudando suas causas e efeitos, de forma a chegar a possíveis soluções, utilizando o Método Taguchi. Para a elaboração do estudo de caso, foi proposta a metodologia do arranjo ortogonal de GENICHI TAGUCHI (ROSS, 1991) (JIJU, 1995) a fim de alcançar os resultados satisfatórios, porém para melhor entendimento foi dividido em etapas de desenvolvimento. As diversas etapas do método de Taguchi podem ser resumidas de acordo com a seguinte sequência:

01- Definição do problema a ser solucionado; 02- Determinar o objetivo da experiência; 03- Identificação dos fatores que supostamente exercem influência sobre as características de desempenho; 04- Divisão dos fatores em fatores de controle e de ruído; 05- Determine o número de níveis para todos os fatores; 06- Identificar os fatores de controle que possam interagir; 07- Traçar o gráfico linear exigido para fatores de controle e interações; 08- Selecione as matrizes ortogonais; 09- Atribua fatores e interações às colunas; 10- Determinar os métodos de medição. O sistema de medição pode exigir uma experiência em separado para melhorar a precisão das medições; 11- Execute a experiência; 12- Análise os dados; 13- Interpretação dos resultados; 14- Selecione os níveis ótimos dos fatores de controle que mais influenciam e faça uma previsão dos resultados esperados; 15- Execute a experiência de confirmação; 16- Retorne à etapa 4 se o objetivo da experiência não foi alcançado e uma otimização adicional for possível com fatores confirmados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA

O Método Taguchi.

O principal objetivo do método é melhorar as características do processo ou de um produto através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis, que irão minimizar a variação do produto final em relação ao seu objetivo, como exposto por Ross (1991) e Jiju (1995). Ao ajustar os fatores no seu nível

ótimo, os produtos podem ser fabricados de maneira a que se tornem mais robustos a toda e qualquer mudança que possa ocorrer. A Figura 1 esboça o modelo de aplicação do método.

Delineamento de Experimento.

Identificam-se os fatores principais através do *brainstorming* (ruído e fatores principais do ambiente e processo de fabricação), com o intuito de verificar a possível influência para cada um deles e interações. Trata-se de uma etapa muito importante, pois a não consideração de um determinado fator ou parâmetro pode distorcer ou impedir a obtenção da função perda, a qual irá guiar a obtenção de um projeto mais robusto. Abordado de forma detalhada por Juran (1992), Kaplan (2001) e Rosini (2003).

Inicia-se a escolha da matriz ortogonal que melhor se aplica ao problema, este trabalho depende do número de fatores e da quantidade de experimentos que pretendemos realizar, conforme a disponibilidade de tempo e custo. Miores detalhes podem ser encontrados em Akao (1988), Montgomery (1983) e Ikezawa (1994). Em seguida definem-se os níveis de parâmetros. A seguir com o plano de trabalho, faz a coleta de dados, com os cuidados necessários para registro adequado.



Figura 1 - Estratégia para o método proposto.

Na tabela 1 a seguir é apresentada a matriz ortogonal L8, construída a partir da proposta de TAGUCHI, onde foram utilizadas sete colunas para os fatores e interações e oito linhas para a sequência de experimentos a serem realizados, bem como os níveis para os fatores representados pelos algarismos 1 e 2. Esta tabela mostra o arranjo ortogonal, pois mantém em cada coluna quatro algarismos repetidos, detalhe que justifica a ortogonalidade, outro detalhe importante mantido pela ortogonalidade, é o fato do número de linhas ser uma unidade maior que o número de colunas.

Nos estudos realizados, os fatores escolhidos para condução do experimento estão indicados na tabela 2, estes são: **MATÉRIA-PRIMA**; **TINTA** e **MONTAGEM**, vistos como fatores de ruídos internos sobre os quais temos absoluto controle. Os fatores de ruído externo, como: temperatura ambiente, umidade do ar, partículas em suspensão, etc, serão reduzidos a custo aceitáveis através de providências junto à área de

trabalho e equipamentos. Outras técnicas são apresentadas por itSMF (2006), Ulrich (2006) e Kaplan (2004).

Foi estabelecido avaliar todas as interações binominais entre fatores de controle, estabelecida a condição de trabalho para estudar a influência na qualidade da superfície após adequação da pintura e posteriores ações para minimizar a não conformidade, através do uso do AO (arranjo ortogonal) e operacionalização do software QUALITEK-4. Este programa computacional utiliza ferramentas estatísticas para análise dos resultados, gentilmente disponibilizado pela Nutek, Inc. (Bloomfield Hills, Michigan, USA).

Tabela 1 - Matriz de Taguchi.

Experimento	A Matéria-prima	B tinta	C montagem	AB	AC	BC	ABC
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2
3	1	2	1	1	2	2	2
4	1	2	2	2	1	1	1
5	2	1	2	1	1	1	1
6	2	1	2	2	2	2	1
7	2	2	1	1	2	2	2
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabela 2 - Fatores e Níveis para Condução do Experimento.

FATORES	NIVEL 1	NIVEL 2
MATERIA-PRIMA (A)	VIRGEM	RECICLADA
TINTA (B)	ALTA CONCENTRACAO	BAIXA CONCENTRACAO
MONTAGEM (C)	COM LUVA	SEM LUVA

Matriz de planejamento.

Matriz com 2 níveis , 3 fatores e quatro replicações. n° de combinações = $2^3 = 8$ (n° de linhas) \rightarrow n° de colunas = $8 - 1 = 7$.

Tabela 3 - Matriz de Planejamento.

	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	R1	R2	R3	R4	\bar{Y}	S ²
1	1	1	1	1	1	1	1	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	0.09031
2	1	1	2	2	2	2	2	1.4	1.0	1.3	1.6	1.3	0.01531
3	1	2	1	1	1	2	2	1.4	1.6	1.2	1.5	1.4	0.00031
4	1	2	2	2	2	1	1	1.4	1.5	1.2	1.3	1.4	0.30032
5	2	1	2	1	2	1	2	1.7	1.8	1.4	1.2	1.5	0.01532
6	2	1	2	2	1	2	1	1.8	1.1	1.6	1.7	1.6	0.07032
7	2	2	1	1	2	2	2	1.4	1.2	1.3	1.5	1.4	0.00780
8	2	2	1	2	1	1	2	1.1	1.2	1.4	1.3	1.2	0.04135

Foram considerados três fatores e as interações binomiais, quarenta peças não conforme por experimento e selecionadas cinco com maior área manchada e replicadas quatro vezes. Os valores obtidos para as áreas manchadas estão especificadas em milímetros. Após os ensaios as peças foram colocadas em quarentena por trinta dias para análise e conclusões.

3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Análise de Variância - ANAVA.

Através da ANAVA realizado pelo programa computacional QUALITEK 4, podemos concluir através dos dados apresentados na tabela 4, o efeito principal é a variação média na resposta produzida por uma modificação no nível do fator. Este efeito fica perceptível através da interpretação dos resultados, quando podemos verificar que a maior diferença entre níveis ocorre na interação matéria-prima x tinta, com valor igual a 0,194 em módulo.

Tabela 4 - Principais Efeitos Determinados Através do Programa Computacional QUALITEK 4.

	FATORES/INTERAÇÕES	NIVEL 1	NIVEL 2	N2 - N1	N1 - N2
01	Matéria-prima	1.312	1.418	0.105	-0.106
02	Tinta	1.387	1.343	- 0.045	0.044
03	Matéria-prima x Tinta	1.268	1.462	0.193	-0.194
04	Montagem	1.362	1.368	0.006	-0.007
05	Matéria-prima x Montagem	1.343	1.387	0.044	-0.045
06	Tinta x Montagem	1.318	1.412	0.093	-0.094

Análise da Tabela de Variância e Teste de Hipótese.

A ANAVA parte da decomposição da variabilidade total dos dados nas suas componentes, utilizando os quadrados dos somatórios entre tratamentos e somatórios de quadrados residuais. Como apreciado na Equação (1).

$$SQT = SQG + SQR \quad (\text{Eq. 01})$$

Em relação a função resposta sinal/ruído (S/R), serão determinados os fatores que influenciam significativamente e estes serão colocados nos níveis que maximizam a função. Desta forma nos ensaios posteriores deve-se utilizar os fatores significativos para o ajuste da função resposta.

Com base nestas informações são calculados os quadrados médios dos fatores e do erro (MQG e MQR, respectivamente), considerando a hipótese H_0 , onde as médias dos níveis dos fatores são iguais, ou seja, os fatores não afetam a resposta. A aceitação ou a rejeição de H_0 é feita por comparação de $F_0 = MQG/MQR$, com F_c (valor crítico), retirado da tabela da distribuição $F_{\alpha}(k-1, k(n-1))$.

Para um nível de confiabilidade de 95%, dizer que um fator é significativo, equivale afirmar que se a resposta for alterada é porque houve mudança de níveis. Os fatores serão considerados significativos se os respectivos valores de F (calculados) forem superiores ao valor crítico F_c (tabelado). Taguchi propõe duas situações: Se $F_0 > (F_{\alpha, n_f, n_e})$ e Se $F_0 < (F_{\alpha, n_f, n_e})$, onde: α = significância, risco em uma afirmação; N_f = graus de liberdade entre tratamentos, $MQG = SQG/k-1$; N_e = graus de liberdade dentro dos tratamentos, $MQR = SQR/k(n-1)$.

A tabela 5 foi construída com os resultados da ANAVA, relacionando os graus de liberdade utilizados para os fatores de controle e seus respectivos percentuais aplicados aos fatores individuais e interações.

Tabela 5 - Análise de Variância – ANAVA.

	FATORES	GL	SQ	F	PERCENTUAL
01	Matéria-prima (A)	1	0.09031	2.1839	18.356
02	Tinta (B)	1	0.01531	0.3703	3.111
03	Montagem(C)	1	0.00031	0.0076	0.062

04	(A x B)	1	0.30032	7.2621	61.040
05	(A x C)	1	0.01532	0.3704	3.111
06	(B x C)	1	0.07032	1.7004	14.291
TOTAL			1.49218		100%

Determinando a variável de teste $F_{\alpha}(k-1, k(n-1))$ ou fator crítico teórico, através da tabela de SNEDECOR.DRUMONT,FATMA BRANT págs 282/283, onde (k-1) e k(n-1) representam os graus de liberdade entre tratamentos e residual respectivamente, isto é: $k-1=3-1=2$ e $k(n-1)=9$, encontraremos o valor de $F_{\alpha}=4,26$, para $k=3$ fatores e $n=4$ réplicas, os resultados do teste F_0 calculado, estão representados na coluna F da tabela 5, para todos os fatores em estudo. Pode-se observar que o menor valor de F representa o fator montagem(C), na seqüência, temos: tinta(B); matéria-prima x montagem(AxC); tinta x montagem(BxC); matéria-prima(A); e a principal interação é matéria-prima x tinta(AxB) com o $F_0 = 7,26$. Desta forma constata-se que o fator matéria-prima versus tinta é o mais significativo, provocando alterações na variável resposta. Os outros fatores não influenciam significativamente.

Cálculo da Perda Monetária.

Determina-se o valor ótimo para $m = o$ (quanto menor melhor) e uma tolerância do consumidor de $Do = + 0,2\text{Cm}^2$, o custo de reparar ou substituir o gabinete de TV é, em média, de \$3, 00, Isto ocorre quando “y” está fora da faixa citada e representa um custo médio por televisor vendido.

A função perda de qualidade é calculada da seguinte forma:

Tolerância do consumidor é $Do = 0,2\text{Cm}^2$;

Logo, teremos: $L(y) = k(y)^2$; para $y = 0,2\text{Cm}^2$; $y^2 = (0,2)^2 = 0,04 \text{Cm}^4$;

$L(y) = \$3,00$; quando $y = 0,2$; $\$3,00 = k (0,04)$; $k = \$ 75,00 / \text{Cm}^4$;

Logo, utilizando a função $L(y) = k y^2$ para o estudo quando menor é melhor aplicada a média das características medidas na linha de produção variando de 01 até 08,conforme tabela 6.

Tabela 6 - Valores da Função Perda por Experimento.

Experimento	Y(Cm ²)	L(y) = k y ² (\$)
01	1,2	108
02	1,3	127
03	1,4	147
04	1,4	147
05	1,5	169
06	1,6	192
07	1,4	147
08	1,2	108

Estes valores representam a média que está sendo paga pela sociedade. Isto significa uma perda que a sociedade de uma maneira geral, irá pagar em função da qualidade inadequada do produto quanto a esta característica.

Com o passar do tempo o efeito destas perdas, fica caracterizado pelas seguintes manifestações:

- Insatisfação dos clientes;
- Acréscimo de custo de garantia;
- Alto custo e longo tempo para reparar;
- Reputação prejudicada;
- Perdas a longo prazo do market share, etc.

Tabela 7 - Desempenho Ótima de Contribuição.

	FATORES	DESCRIÇÃO DE NIVEL	NIVEL	CONTRIBUIÇÃO
1	Matéria - prima	Virgem	1	-0,054
2	Tinta	Diluída	2	-0,022
3	Matéria - prima x tinta	Inter	1	-0,097
4	Montagem	Com luva	1	-0,004
5	Matéria – prima x montagem	Inter	1	-0,022
6	Tinta x montagem	Inter	1	-0,047

Depois de ter determinado o parâmetro de maior influência na função resposta e também as perdas monetárias por experimentos, sentimos a falta de conhecer o comportamento da função resposta, quando alimentada pelos fatores significativos. Um destes métodos maximiza a função para estes parâmetros, de forma que encontraremos os níveis que não devem ser utilizados.

Ao analisarmos os dados em relação à média da resposta, colocados na tabela 7, podemos perceber que a maior contribuição foi determinada para a relação matéria-prima versus tinta, portanto estes fatores inspiram maior atenção, visto que, qualquer variação em seus parâmetros influenciará consideravelmente o valor da variável resposta.

Conforme podemos observar na tabela 8, os parâmetros e níveis do experimento 6 estão representados na primeira linha, estes níveis se mostram inadequados para o processo produtivo em questão, isto indica que os níveis adequados devem ser os opostos aos apresentados, como indicado na última linha da referida tabela.

Exemplos no setor de serviço são apresentados por Fiates (1995), no processo de fabricação de injeção plástica por Cardoza (2002) e no processo de produção do papel por Poltroniére (2006).

Tabela 8 - Função resposta versus parâmetros e respectivos níveis.

NIVEIS	MATÉRIA-PRIMA	TINTA	MONTAGEM
NÃO RECOMENDADO	Reciclada (2)	Concentrada (1)	Sem luva (2)

RECOMENDADO	Virgem (1)	Diluída (2)	Com luva (1)

4. CONCLUSÕES DO TRABALHO

Após o desenvolvimento e apresentação deste trabalho, enumeramos as seguintes conclusões:

- Trata-se de um método seguro, rápido e rico em detalhes;
- A empresa pode adotar este método para resolver problemas na linha de produção;
- É recomendável o uso deste método em outras áreas da indústria para comprovar a sua eficácia;
- Uma das vantagens do mesmo é a facilidade de aplicação e o baixo custo de operacionalização;
- Os resultados laboratoriais confirmam o que foi deduzido através do método TAGUCHI, isto é: o problema maior estava na contaminação da tinta, com presença de óxido de ferro.

Alguns benefícios obtidos pela redução da variabilidade, com a utilização do Método Taguchi são citados a seguir:

- Redução do nível de refugo, retrabalhos, inspeção de testes e maior satisfação do cliente;
- Foi possível identificar o melhor arranjo das principais variáveis envolvidas na mancha, como sendo o arranjo L8 com utilização de dois níveis;
- Foram determinadas as seguintes variáveis significativas pela formação da mancha: tinta, matéria-prima e montagem.
- Classificação dos fornecedores de matéria prima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akao, Y. *Quality Function Deployment: integrating customers requirements into product desing*. Cambridge: Massachusets, Productivity Press, 1988.
- Cardoza, G., Vladimir, E. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo – USP, Brasil. 2002.
- Faxina, A. L. Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo – USP, Brasil. 2006.
- Fiates, G. S. A Utilização do QFD Como Suporte a Implantação do TQC em Empresas do Setor de Serviços. *Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Produção*. Santa Catarina: UFSC, 1995.
- Greco, J. A. S. Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo – USP, Brasil. 2004.
- Ikezawa, T. *Quality Control in the Stage of Sales and After-Service*. Tokyo: Japenese Standards Association, 1994.
- itSMF. Foundations of IT Service Management: Based on ITIL. Van Haren Publishing. 2006.
- Jiju, A., Kaye, M. A Methodology for Taguchi Design of Experiments for Continuous Quality Improvement. Quality Word TS, p. 98-102, September 1995.

Juran, J.M. *A Qualidade desde o Projeto: novos passos para planejamento da qualidade em produtos e serviços*. São Paulo: Ed. Pioneira, 1992.

Kaplan, R.S. Norton, D.P. Kaplan e Norton na prática. Elsevier Brazil. 2004.

Kaplan, R.S., Norton, D.P. Organização orientada para a estratégia: como as empresas que adotam o balanced scorecard. Elsevier Brazil. 2001.

Maltez, J., Ubirajara, P. ExpVVT: uma ferramenta de apoio à condução de experimentos baseados em documentos de requisitos. Dissertação de mestrado, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC) – Universidade de São Paulo – USP, Brasil. 2006.

Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments. New York: John Wiley & Sons, 1983.

Poltroniere, S.S.C. Otimização do processo de corte integrado à produção de bobinas - modelos e métodos de solução. Tese de Doutorado, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC) – Universidade de São Paulo – USP, Brasil. 2006.

Rosini, A.M. Administração de sistemas de informação e a gestão do conhecimento. Thomson Learning Ibero. 2003.

Ross, P. J. Aplicações das Técnicas de Taguchi na Engenharia da Qualidade. McGraw-Hill Ltda. São Paulo. 1991.

Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA. Internet, Site: <http://www.suframa.gov.br>, em 30.06.2007 as 15PM.

Ulrich, S. MAPA: manual de planejamento e avaliação de projetos. Sete Mares. 2006.