

Método para otimização do polimento de cobre de uma matriz de rotogravura.

Artigo a ser submetido à revista Produção.

Ingrid Steinstrasser (UFRGS) – ingrid.steinstrasser@gmail.com

Flávio Sanson Fogliatto (UFRGS) – ffogliatto@producao.ufrgs.br

RESUMO

O Projeto e Avaliação de Experimentos (PAE) é uma técnica amplamente utilizada para conhecer e otimizar os mais variados processos. Neste estudo, o PAE foi utilizado para otimizar o processo de polimento do cobre de uma matriz de rotogravura. A principal motivação para este estudo foi a dificuldade que o setor de galvanoplastia apresentava para obter a rugosidade do cobre no valor especificado. Isso ocorria devido à falta de conhecimento sobre a máquina de polimento em relação aos parâmetros de entrada e de saída. A partir da identificação desse problema, foi proposto um roteiro para coletar as informações pertinentes de forma a organizar dois experimentos sequenciados para otimizar o processo. Como resultado, foi obtida a combinação ótima com os valores de quatro parâmetros de entrada para cada um dos dois experimentos, além da validação do roteiro proposto.

PALAVRAS-CHAVE: otimização, projeto e avaliação de experimentos, rotogravura, polimento do cobre, rugosidade.

ABSTRACT

Copper Polishing Optimizing Method for Gravure Cylinders. The statistical technique of Design of Experiments (DOE) is widely used to understand and optimize various processes. In this paper DOE was applied to optimize the copper polishing process of gravure cylinders. The main motivation for this study was the difficulty encountered by the electroplating department to obtain the copper roughness at a target value. This occurred due to lack of knowledge about the polishing machine with respect to input and output parameters. Once identified the problem, a data collection schedule was proposed to organize two sequential experiments to optimize the process. The optimized combination of four input parameters for each of the two experiments was determined and validated in practice.

1. Introdução

O método de rotogravura é conhecido como líder na produção de itens com imagens nítidas, cores vivas e variados tons, resultando em impressões de alta resolução e fidelidade. Para que se obtenha um produto adequado no final da linha produtiva, cada etapa deve passar pela operação de autoinspeção. Para se garantir a qualidade final do impresso, deve-se ter preocupação, inicialmente, com a produção das matrizes, ou seja, com o processo de galvanoplastia dos cilindros. Um dos processos críticos é o de revestimento de cobre, pois é nessa camada que é feita a gravação da arte. Sendo assim, se a espessura, dureza e rugosidade do cobre não estiverem de acordo com o estipulado, a impressão de embalagens, fotos, livros, revistas ou qualquer outro produto será comprometida.

Campos (2004) dá ênfase para a importância do controle nos processos a fim de se chegar à melhor qualidade possível. Ele considera que as bases de controle são: “localizar o problema,

analisar o processo, padronizar e estabelecer itens de controle de tal forma que o problema nunca mais ocorra” (CAMPOS, 2004, p. 25). Então, o primeiro passo de uma investigação, experimento ou pesquisa é estimar se os resultados obtidos no presente estão dentro ou fora dos padrões. Dessa forma, se os cilindros produzidos na galvanoplastia apresentam variação nos parâmetros do cobre, a padronização, o controle e a otimização dos processos envolvidos são necessários.

Segundo Sakkas *et al.* (2010), otimização de processos é uma forma de ajustar os parâmetros de estudo de maneira que sejam obtidos os melhores resultados. Para tanto, o Projeto e Avaliação de Experimentos (PAE) é uma técnica amplamente utilizada nas mais diversas áreas, principalmente na engenharia, a fim de otimizar processos, bem como aprender sobre eles. Sendo assim, a elaboração e execução de um projeto experimental é muito útil para obter confiabilidade dos processos, reduzir custos de produção e diminuir o tempo destinado ao desenvolvimento de novos produtos (MONTGOMERY, 2001).

O estudo reportado neste artigo foi conduzido em uma gráfica onde são produzidas embalagens com a utilização da técnica de rotogravura. O setor de galvanoplastia vem apresentando dificuldades para obter o valor da rugosidade do cobre desejado pela empresa. Com a identificação desse problema de qualidade, a elaboração e execução de um Projeto e Avaliação de Experimentos mostrou-se pertinente. Seu método permite estruturar a pesquisa a ser realizada, de forma que se faça o menor número de ensaios com o menor custo e tempo. Ainda, a garantia de resultados confiáveis deve-se ao fato da estruturação, execução e análise dos dados obtidos no projeto serem fundamentados em conceitos estatísticos (RIBEIRO e CATEN, 2003).

Portanto, foram realizados testes na máquina de polimento do setor de galvanoplastia. As variáveis de entrada definidas foram: número de passadas de cada rebolo (pedra de polimento), pressão exercida por eles na superfície do cilindro, velocidade de rotação dos rebolos e suas velocidades de avanço ao longo do cilindro. Os resultados aqui apresentados não implicam somente na padronização e melhoria da confiabilidade do processo, mas também na eliminação de retrabalho dos cilindros devido à rugosidade do cobre fora de especificação. O estudo também visa proporcionar um maior conhecimento sobre a máquina de polimento dos cilindros utilizados em rotogravura, otimização do equipamento e erradicação de cilindros com o cobre fora da faixa de rugosidade aceitável. Essa garantia de qualidade tem impacto direto no setor de rotogravura, como detalhado na seção de procedimentos metodológicos. Portanto, esse estudo tem o objetivo de elaborar e validar um roteiro de análise que possa ser reproduzido em qualquer processo de polimento de cobre para que se obtenha a rugosidade que se deseja com a menor demanda de tempo e recursos econômicos possíveis.

Estruturou-se o presente artigo em cinco seções. Após esta introdução, é apresentado o referencial teórico sobre os assuntos nos quais se fundamenta o estudo: conceito de qualidade, qualidade na rotogravura, otimização de processos e PAE, rugosidade e velatura e, por fim, polimento do cobre. A seguir, são expostos os procedimentos metodológicos com o detalhamento de como os experimentos foram elaborados e conduzidos. A quarta seção trata dos resultados obtidos a partir da coleta e análise dos dados. Ao final do trabalho, são apresentadas as conclusões.

2. Referencial Teórico

Qualidade é um conceito subjetivo, visto que cada pessoa a percebe de diferentes formas dependendo das suas necessidades e expectativas (CROSBY, 1994), o que gera abordagens

particulares sobre o tema. Para Juran e Gryna (1993), a qualidade está diretamente ligada à satisfação do cliente, tanto do interno quanto do externo, o que pressupõe as características desejadas do produto e ausência de defeitos no decorrer do processo e ao seu final. Zhang (2001) concorda que o principal motivador da qualidade é o cliente, pois é ele quem define as demandas. Assim, tem-se qualidade quando o produto é projetado conforme as especificações do cliente e apresenta, ao final do processo, aquelas características. Já Campos (2004) vai além e menciona cinco diferentes dimensões da qualidade. Para ele, além de atender às necessidades do cliente (projeto perfeito), também é necessário ter confiabilidade (ausência de defeitos), acessibilidade (baixo custo) e segurança (segurança do cliente), tudo isso no tempo certo (entrega no prazo, local e quantidade certos).

Conforme conceitos anteriores, verifica-se a abrangência e a importância da qualidade quando associada aos diferentes tipos de processos. Um exemplo é o processo de rotogravura em que características como tonalidade das cores, nitidez, brilho e alinhamento das imagens são determinantes na garantia de qualidade obtida no produto final.

Devido à importância da técnica de rotogravura, nos anos 80, a *Gravure Education Foundation* (GEF) percebeu a necessidade de dar foco especial no ensino da rotogravura e implementou Centros de Recursos de Rotogravura em seis universidades norte-americanas. Com as discussões feitas com profissionais e professores da área nesses centros, surgiu a idéia de elaborar um livro que englobasse todas as técnicas modernas de rotogravura, visto que, até então, não havia literatura com tal abrangência. Assim, a GEF, juntamente com a *Gravure Association of America* (GAA), elaborou e publicou o livro *Gravure – Process and Technology* no ano de 1991, com uma nova e atualizada edição em 2003 devido aos avanços na tecnologia de artes gráficas. Neste livro, que tem a colaborações de diversas instituições e profissionais, estão registrados todos os processos necessários para se produzir embalagens, fotos, livros, revistas, selos e os mais variados produtos com a qualidade que se deseja utilizando a técnica de rotogravura. Nele, são abordados detalhadamente cada processo envolvido na impressão de um produto perfeito. Um desses processos consiste na obtenção de matrizes com rugosidade superficial adequada para a impressão por rotogravura.

Superfícies apresentam características que são geradas a partir do processo ao qual o material é submetido, como, por exemplo, retífica, torneamento e fresamento. Essas características são as imperfeições da peça que podem ou não ser detectadas a olho nu, bem como podem ser regulares ou irregulares. O conjunto dessas características, chamadas de rugosidade, que conferem textura ao material trabalhado. Rugosidade, então, são as imperfeições da superfície resultantes das ferramentas utilizadas durante o processo. A medição da rugosidade é realizada com a utilização de aparelhos chamados rugosímetros. O rugosímetro pode ser do tipo mecânico, que utiliza diamante como apalpador, ou do tipo óptico, que utiliza laser (SILVA, 2006).

Na produção de matrizes no setor de galvanoplastia de cilindros para a técnica de impressão por rotogravura, quando a rugosidade do cobre dos cilindros não está dentro da faixa estipulada ocorre uma não-conformidade, denominada velatura. A velatura é um defeito que é detectado somente na impressão (ou seja, no setor de rotogravura) e consiste em um “véu” de tinta onde não há gravação, formando uma sombra na área do papel não gravada (KIPPHAN, 2001).

Os estudos existentes acerca do polimento do cobre versam sobre a técnica de polimento químico mecânico, que é utilizada para se obter uma planarização total em superfícies *wafers* de semicondutores. No trabalho aqui apresentado, foi feita uma analogia com o polimento puramente mecânico utilizado na galvanoplastia de cilindros para rotogravura para

identificação de parâmetros a serem estudados, devido à semelhança entre essas duas técnicas. O polimento químico mecânico utiliza uma substância química, geralmente em forma de suspensão, diretamente na superfície, para realizar uma reação, enquanto que uma pedra rota sobre a superfície do *wafer* revestido com cobre que se deseja planarizar. Esse tipo de polimento é dividido em duas etapas para a maioria das suspensões polidoras: a primeira é mais agressiva, remove maior quantidade de massa e deixa a superfície mais uniforme, eliminando picos; a segunda utiliza uma pressão de polimento mais baixa – chamada *soft landing* – e visa minimizar a erosão causada durante o acabamento (LAURSEN e GRIEF, 2002). A identificação dos ajustes adequados para os parâmetros nas duas etapas do polimento é essencial para garantir a qualidade do material impresso a partir dos cilindros. Para tanto, a técnica de PAE pôde ser utilizada.

Prevenir a fabricação de produtos defeituosos e minimizar a variabilidade dos processos são preocupações necessárias quando se deseja otimizar a produção (JURAN e GRAYNA, 1993). Se os processos forem controlados é possível otimizá-los mesmo que os resultados estejam dentro dos padrões, pois melhorias adicionais sempre são possíveis, levando a economia de tempo e recursos econômicos (CAMPOS, 2004). A fim de otimizar processos, pode-se utilizar a técnica PAE, mas, para isso, Antony (1998) enfatiza que é crucial definir variáveis de saída possíveis de serem investigadas; ou seja, devem-se medir características que afetam diretamente a qualidade final do produto. Essas características podem ser do tipo maior é melhor-menor é melhor-nominal é melhor. Ainda, o autor afirma que as variáveis medidas devem ser contínuas, fáceis de medir e que relacionem as entradas com as saídas.

O PAE permite estudar mais de uma variável de entrada, bem como múltiplas variáveis de saída e suas interações. Idealmente, determina-se um modelo matemático para o processo em questão que relacione variáveis de entrada e de saída. Há várias maneiras de se projetar um experimento e a escolha do melhor método depende do problema identificado, da quantidade de variáveis de entrada e de saída, e da identificação dos fatores controláveis e daqueles que não se pode controlar (MONTGOMERY, 2001). Portanto, para definir qual projeto experimental será utilizado, é preciso conhecer o processo a ser estudado para que se possa chegar a resultados satisfatórios na otimização.

Experimentos fatoriais do tipo 2^k , por exemplo, permitem o estudo de k fatores (ou variáveis de entrada), cada um deles variando somente a dois níveis, alto ou baixo, podendo ser quantitativos ou qualitativos (RIBEIRO e CATEN, 2003). Esse método é vantajoso por indicar, de forma econômica, as variáveis que causam maiores efeitos nas saídas, bem como as interações entre as variáveis estudadas (TSAO e WIBOWO, 2005).

No estudo do processo de polimento dos semicondutores foram variados quatro parâmetros: velocidade de rotação da pedra de polimento, velocidade de rotação do *wafer*, pressão exercida durante o polimento pela pedra sobre o *wafer*, e força de aspiração. Esses parâmetros foram variados a dois níveis (alto e baixo), sendo investigados os efeitos principais e de interação entre parâmetros (KIM *et al.*, 2006). Com base nesse estudo, foi possível elaborar um caso de análise para padronizar e otimizar o polimento do cobre de cilindros para rotogravura.

3. Procedimentos Metodológicos

O presente estudo é uma pesquisa-ação, de base quantitativa e natureza explicativa, pautada sobre a técnica de Projeto e Avaliação de Experimentos. Conduziu-se o estudo em uma empresa que possui um departamento gráfico onde são produzidas as embalagens para os seus

produtos com a utilização da técnica de rotogravura. A origem do problema está nesse departamento que até o ano de 2008 estava localizado no Estado do Rio de Janeiro. Dada a necessidade de modernização da organização, o mesmo foi transferido para o Estado do Rio Grande do Sul. Devido à mudança de local, aquisição de alguns equipamentos novos e reestruturação da equipe, constataram-se instabilidades na produção.

Uma das principais fontes de instabilidade é a máquina de polimento do setor de galvanoplastia, que foi substituída devido à sua obsolescência. O novo equipamento introduzido tem como recurso um *software* de fácil programação, que permite alterar as variáveis de entrada. Estas variáveis são: número de passadas de cada rebolo, pressão exercida pelos rebolos na superfície do cilindro, velocidade de avanço dos rebolos ao longo do cilindro, velocidade de rotação dos rebolos e velocidade de rotação do cilindro. Não há especificações de programação desses parâmetros no manual operacional da máquina para que se obtenha a rugosidade do cobre dentro da faixa estipulada pelo setor de qualidade da empresa.

Dessa forma, foi estruturado um caso para análise composto de cinco fases, distribuídas da seguinte forma: (i) identificação do problema; (ii) organização do experimento; (iii) realização do experimento; (iv) análise dos resultados com auxílio de *software* estatístico; e (v) otimização do experimento com auxílio de planilha de cálculos.

Com essas informações foi possível verificar a importância de cada fase para o estudo e estabelecer comparações entre as práticas atuais e os resultados encontrados no experimento. Isso permitiu a redefinição do processo estudado, bem como as práticas gerenciais associadas a ele.

4. Resultados

4.1 Descrição dos dados

O processo de galvanoplastia de cilindros é composto por vários microprocessos, cuja seqüência é apresentada na Figura 1. Cabe à parte inicial do trabalho identificar o problema (não-conformidade) do processo, através de medições feitas com um rugosímetro mecânico *Taylor Hobson*, modelo *Surtronic 25*, na atividade de polimento, destacada na Figura 1.

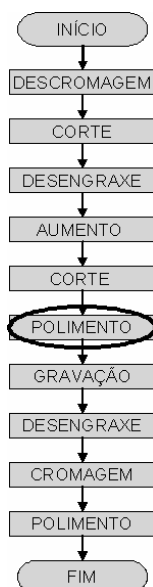


Figura 1 – Fluxograma das atividades do processo

As medições indicaram que a rugosidade do cobre, quando o cilindro sai do banho de cobre, está abaixo do valor estabelecido pelo setor de rotogravura da empresa. Os valores medidos são de $0,2\mu\text{m}$, enquanto que a faixa ideal estabelecida pela empresa é de $0,5\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$. Quando a rugosidade está fora dessa faixa, ocorre a velatura e isso impacta a produção no setor de rotogravura. Esse impacto acontece, pois a máquina imprime a arte no papel com uma velocidade média de $300\text{m}/\text{min}$ e cada *setup* demora aproximadamente duas horas. Assim, se um cilindro é liberado com a rugosidade fora dos limites, ou o cilindro deve ser refeito – o que demora, aproximadamente, 12 horas – ou deve ser feito novo *setup* na máquina de rotogravura. Em ambos os casos têm-se perdas de produção. Devido a isso, é necessária uma inspeção na fonte, que tem como objetivo inibir a geração do defeito antes do cilindro ser liberado para o setor de rotogravura, evitando perdas de: (i) tempo com retrabalho, (ii) máquina parada, (iii) matéria-prima, e (iv) recursos econômicos. Para corrigir o valor de rugosidade, o cilindro é polido na máquina Finishstar do fabricante MDC Max Daetwyler, apresentada na Figura 2. Porém, a programação da máquina é totalmente empírica, demandando a combinação de dois programas diferentes, totalizando 20 minutos de processo.

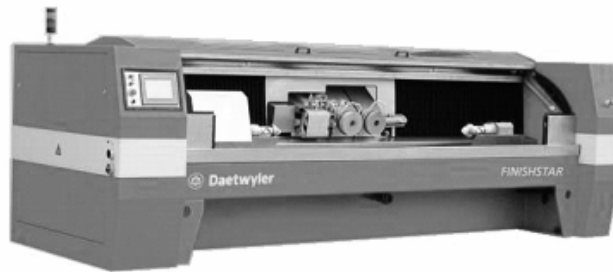


Figura 2 – Máquina de polimento Finishstar do fabricante MDC Max Daetwyler com os dois rebolos ao centro

Identificado o problema, o próximo passo foi organizar um experimento com o objetivo de padronizar o programa utilizado na máquina de polimento, de forma que a rugosidade do cobre esteja de acordo com o valor utilizado no processo da empresa. Para tanto, elaborou-se uma ficha com o título do experimento, os objetivos, o nome de todos os integrantes da equipe de trabalho, local e data. A ficha também contém informações fornecidas pelo cliente (no caso, clientes internos dos setores de rotogravura e qualidade) com as principais características de qualidade e a importância de cada uma delas. A seguir, a equipe técnica elaborou a Tabela 1, que contém as variáveis de saída. Para cada variável é identificado o tipo, valor alvo, especificações mínimas e máximas, e importância relativa. A importância varia através em uma escala zero até um, onde um denota a importância máxima.

Tabela 1 – Tabela com os dados das Y_j variáveis de saída

Variável de Saída	Tipo	Alvo	Especificações		Importância
			Mín	Máx	
Y_1 : rugosidade inicial do cobre	nominal	não há	não há	não há	0
Y_2 : rugosidade do cobre após polimento com reboło 1	nominal	não há	não há	não há	0,5

Y_3 : rugosidade do cobre após polimento com rebolo 2	nominal	0,6	0,5	0,7	1
---	---------	-----	-----	-----	---

A coleta das informações necessárias para definição do delineamento experimental utilizado resultou nas seguintes variáveis de entrada a serem investigadas: (i) número de passadas de cada rebolo, (ii) pressão exercida pelos rebolos na superfície do cilindro, (iii) velocidade de rotação dos rebolos, e (iv) velocidade de avanço de cada rebolo ao longo do cilindro. Como a máquina conta com dois rebolos, o experimento contemplaria oito variáveis, o que resultaria em uma grande quantidade de rodadas experimentais. Assim, optou-se por dividir o experimento conforme o rebolo: Processo 1 (polimento com o rebolo de 1000 granas) e Processo 2 (polimento com o rebolo de 2000 granas), cada processo investigando quatro variáveis de entrada a dois níveis, além de um ponto central. Os valores das variáveis de entrada são iguais tanto para o Processo 1 quanto para o Processo 2. Com o experimento definido dessa forma, foram definidas 17 rodadas por processo, das quais uma delas contempla o ponto central.

Optou-se tratar cada rebolo como dois processamentos sequenciados. Sendo assim, a rugosidade foi medida três vezes, sendo Y_1 , Y_2 e Y_3 as variáveis de saída do estudo, conforme definidas na Tabela 1. A variável de saída mais importante na otimização é Y_3 ; porém, Y_1 e Y_2 são importantes para entender o comportamento da rugosidade frente a variações nas variáveis controláveis. Na Tabela 2 estão informados os parâmetros dos dois processos sequenciados a serem testados no experimento, seus ajustes atuais e sugeridos, o intervalo de pesquisa com os valores mínimos e máximos e a facilidade de ajuste de cada parâmetro. Para obter informações sobre os parâmetros de processo foi consultado o fornecedor do equipamento, que informou os limites indicados de variação e identificou aqueles que afetam mais diretamente as variáveis de saída, em sua opinião.

Tabela 2 – Informações sobre parâmetros do processo testados no experimento

Parâmetros do Processo	Ajuste Atual	Ajuste Sugerido	Intervalo de Pesquisa		Ajuste
			Mín	Máx	
X_1 : rebolo 1	1000 granas	não há	800	1500	difícil
X_2 : número de passadas do rebolo 1	4 vezes	não há	2	6	fácil
X_3 : pressão do rebolo 1	35Kg	não há	20	40	fácil
X_4 : velocidade de rotação do rebolo 1	350rpm	não há	100	200	fácil
X_5 : velocidade de avanço do rebolo 1	20mm/R	não há	15	25	fácil
X_6 : velocidade de rotação do cilindro para o rebolo 1	100m/min	não há	50	100	fácil
X_7 : rebolo 2	2000 granas	não há	2000	3000	difícil
X_8 : número de passadas do rebolo 2	13 vezes	não há	2	6	fácil
X_9 : pressão do rebolo 2	40Kg	não há	20	40	fácil
X_{10} : velocidade de rotação do rebolo 2	200rpm	não há	100	200	fácil
X_{11} : velocidade de avanço do rebolo 2	30mm/R	não há	15	25	fácil

X_{12} : velocidade de rotação do cilindro para o rebolo 2	100m/min	não há	50	100	fácil
--	----------	--------	----	-----	-------

Na sequência, foi elaborada a Tabela 3 com a lista dos fatores de ruído. Fatores de ruído correspondem àqueles que não podem ser controlados, mas que podem interferir no processo. Devido a essas interferências, que não podem ser controladas, não-conformidades podem ser geradas, o que acarreta em uma variabilidade indesejável no processo.

Tabela 3 – Fatores de ruído considerados no experimento

Fatores de Ruído

Z_1 : desgaste dos rebolos

A partir dos dados levantados nas tabelas anteriores, foi realizada a análise da intensidade do relacionamento entre os parâmetros do processo e as variáveis de saída. Para tanto, foi utilizada a escala apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Escala de intensidade das relações e interações dos parâmetros do processo com as variáveis de saída

Intensidade das Relações e Interações	Valor Numérico
Inexistente	0
Fraca	1
Moderada	2
Forte	4

Os resultados foram organizados na Tabela 5, onde K_1 corresponde à soma dos valores de cada coluna quando multiplicado o IE pelo valor da importância de cada variável de entrada. Por sua vez, K_2 corresponde à soma de cada linha quando multiplicado o IE pelo valor da importância de cada variável de entrada. Os parâmetros a serem investigados no experimento foram identificados através do índice de priorização na equação (1), cujos resultados foram lançados na Tabela 6. Na mesma tabela, também, são apresentados os níveis reais de experimentação dos parâmetros priorizados e seus níveis codificados.

Tabela 5 – Relações entre parâmetros do processo e variáveis de saída

		$R_{ij} = \text{Relações } X_i Y_j$												
	IE	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	K_2
Y_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_2	0,5	2	4	4	4	4	1	0	0	0	0	0	0	9,5
Y_3	1	0	0	0	0	0	0	2	4	4	4	4	1	19
	K_1	1	2	2	2	2	0,5	2	4	4	4	4	1	

Finalmente, na Tabela 7, encontram-se os parâmetros que serão mantidos constantes, bem como os seus possíveis ajustes.

$$PR(x_j) = (\sum_i R_{ij} \times IE_i) / (\sum_i IE_i) \quad (1)$$

onde R_{ij} é a relação entre a variável de saída i e o parâmetro do processo j , e IE_i é o índice de importância para a variável de saída i .

Tabela 6 – Tabela de priorização

Fatores controláveis	PR_j	Níveis Reais	Níveis Codificados
Número de passadas do rebolo 1	1	2	2 e 6 vezes
Pressão do rebolo 1	1	2	20 e 40 Kg
Velocidade de rotação do rebolo 1	1	2	100 e 200 rpm
Velocidade de avanço do rebolo 1	1	2	15 e 25 mm/R
Número de passadas do rebolo 2	4	2	2 e 6 vezes
Pressão do rebolo 2	4	2	20 e 40 Kg
Velocidade de rotação do rebolo 2	4	2	100 e 200 rpm
Velocidade de avanço do rebolo 2	4	2	15 e 25 mm/R

Tabela 7 – Fatores mantidos constantes e seus ajustes

Fatores mantidos constantes	PR_j	Ajuste
Rebolo 1	2	1000 granas
Rebolo 2	2	2000 granas
Velocidade de rotação do cilindro para o rebolo 1	1	100 m/min
Velocidades de rotação do cilindro para o rebolo 2	1	100 m/min

Para cada processo, foi executado um planejamento fatorial completo 2^k com um ponto de centro e gerados gráficos de efeitos principais e de interações. Essa abordagem mostrou-se viável por economizar tempo (menor número de rodadas do que um experimento a três níveis, por exemplo) e recursos econômicos, conferindo a eficiência desejada. Isso possibilitou avaliar o roteiro aqui proposto. Depois de executar as rodadas experimentais, coletar os tempos e rugosidades resultantes de cada uma delas, os dados foram analisados com auxílio de *software* estatístico.

4.2 Análise e interpretação dos dados

Para melhores resultados, o experimento foi aleatorizado segundo a Tabela 8 com a utilização de *software* estatístico. Na seqüência, os níveis altos e baixos, bem como o ponto central dos experimentos, foram codificados como 1, -1 e 0, respectivamente a fim de facilitar o trabalho dos dados obtidos. Além disso, foram consideradas e codificadas as interações entre as variáveis.

Tabela 8 – Organização dos experimentos

Ordem Padrão	Ordem Aleat.	Passadas (X_1)	Pressão (X_2)	Vel. de Rotação (X_3)	Vel. do Carro (X_4)
2	1	6	20	100	15
9	2	2	20	100	25
6	3	6	20	200	15
5	4	2	20	200	15
17	5	4	30	150	20
1	6	2	20	100	15
13	7	2	20	200	25
16	8	6	40	200	25
11	9	2	40	100	25
7	10	2	40	200	15
4	11	6	40	100	15
15	12	2	40	200	25
12	13	6	40	100	25
10	14	6	20	100	25
3	15	2	40	100	15
14	16	6	20	200	25
8	17	6	40	200	15

Para melhor trabalhar os dados, foram utilizadas as diferenças entre as medições. Dessa forma, a diferença 1 (dif_1) corresponde à diferença entre a rugosidade do cobre após o Processo 1 (Y_2) e a rugosidade inicial do cobre (Y_1). O objetivo foi de maximizar essa diferença, pois a rugosidade do cobre após o processo de aumento é muito baixa e para atingir o valor que a empresa trabalha, é necessário um aumento nessa rugosidade. Já a diferença 2 (dif_2) corresponde à diferença entre a rugosidade do cobre após o Processo 2 (Y_3) e a rugosidade do cobre após o Processo 1 (Y_2). O objetivo foi de minimizar essa diferença, pois após o processo 1, o valor da rugosidade do cobre já está bem próximo à faixa que a empresa

trabalha. Como o processo 2 é somente de acabamento, não é necessário diminuir muito a rugosidade já obtida.

Foi realizada uma análise de regressão para as variáveis de saída dif_1 e dif_2 , resultando nas equações (2) e (3), respectivamente. Os valores entre parênteses informam a significância dos termos incluídos no modelo. O ajuste dos dados aos modelos é informado pelo coeficiente de determinação R^2 . No caso do modelo da eq. (2), obteve-se um R^2 de 0,644; no caso do modelo da eq. (3), obteve-se um R^2 de 0,517.

$$dif_1 = 0,081(0,000) - 0,002X_4(0,010) - 0,011X_2X_3(0,010) + 0,009X_2X_4(0,036) \quad (2)$$

$$dif_2 = -0,019(0,000) - 0,006X_1X_2(0,041) - 0,009X_2X_4(0,007) \quad (3)$$

Definidos os melhores modelos matemáticos, foi utilizada uma planilha eletrônica para determinar o ajuste ótimo dos parâmetros de processo. Para que se obtenha a otimização do processo de polimento, a dif_1 deve ser maximizada e a dif_2 deve ser minimizada.

O modelo matemático para o Processo 1 atingiu o ponto ótimo nas rodadas de ordem aleatória 3 e 4, apresentadas na Tabela 9. Foram realizadas duas rodadas extras para cada uma dessas rodadas e a que apresentou melhor resultado foi a de número 3, destacada em cinza na Tabela 9. Já o modelo matemático para o Processo 2 atingiu o ponto ótimo nas rodadas de ordem aleatória 4, 6 e 8, apresentadas na Tabela 10. Foram realizadas duas repetições adicionais para cada rodada e a que apresentou melhor resultado foi a de número 6, destacada em cinza na Tabela 10.

Tabela 9 – Ajuste ótimo dos parâmetros de processo para dif_1

Ordem Aleatória	X_2 Real	X_2 Codif.	X_3 Real	X_3 Codif.	X_4 Real	X_4 Codif.	dif_1
3	20	-1	200	1	15	-1	0,103
4	20	-1	200	1	15	-1	0,103

Tabela 10 – Ajuste ótimo dos parâmetros de processo para dif_2

Ordem Aleatória	X_1 Real	X_1 Codif.	X_2 Real	X_2 Codif.	X_4 Real	X_4 Codif.	dif_2
4	2	-1	20	-1	15	-1	-0,034
6	2	-1	20	-1	15	-1	-0,034
8	6	1	40	1	25	1	-0,034

4.3 Implicações gerenciais

Os cilindros produzidos no setor de galvanoplastia são uma das matérias-primas da impressão de embalagens, pois cada cilindro é a matriz que contém a arte a ser impressa. No setor onde é realizada a impressão, existem quatro máquinas para produzir aproximadamente 200 produtos. Isso implica em uma alta frequência de *setups*, totalizando uma média de 35 paradas por máquina a cada mês, dependendo da demanda, sendo que cada parada tem uma duração

média de duas horas, em média. Assim, se um cilindro entra na máquina com defeito ele pode seguir dois caminhos: reprocesso, o que leva em torno de 6 horas, ou troca de produto na máquina, o que demanda novo *setup*. Qualquer uma das duas alternativas é de grande impacto na produção. Assim, é desejável que o cilindro esteja em condições ao entrar em máquina.

A empresa trabalha com indicadores de paradas. No primeiro semestre de 2010 foram registradas 66 paradas tendo a velatura como causa, totalizando 65 horas e 40 minutos, somente considerada a máquina Rotomec 1. A Figura 3 apresenta um gráfico das paradas por velatura nessa máquina durante o primeiro semestre de 2010.

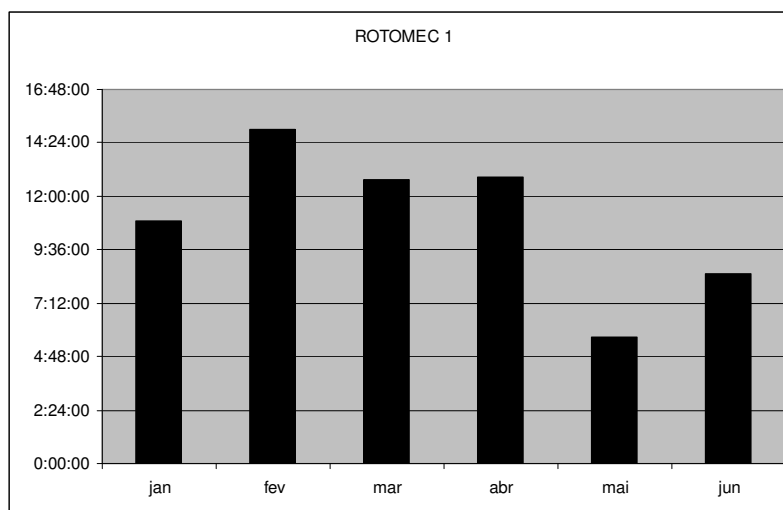


Figura 3 – Paradas (horas) por velatura na máquina Rotomec 1 no primeiro semestre de 2010

Observa-se que nos meses de temperaturas mais elevadas a máquina apresentou maior tempo de parada. Nesses meses a produção é maior, pois o consumo do produto em questão aumenta, e isso acarreta em um maior número de *setups*. O número de *setups*, por sua vez, está diretamente associado com a ocorrência de velatura, pois mais matrizes são produzidas para a impressão das embalagens.

Com a realização do experimento foi possível padronizar o programa utilizado na máquina de polimento. Devido a isso, a rugosidade do cobre não deve mais apresentar variações fora do valor desejável. Assim, as paradas por velatura não devem mais ocorrer e, conseqüentemente, o tempo de máquina parada deve diminuir, aumentando a produtividade de todas as quatro máquinas do setor de rotogravura. Isso possibilita uma disponibilização média de 10h/mês a mais de produção para cada máquina do setor. Considerando que cada máquina produz 300 metros de papel impresso por minuto, a produtividade aumentaria em 180.000 metros por mês. Isso é importante, pois impacta na produtividade de tal forma que permite o manejo de outros setores a fim de obter novas melhorias.

Os ganhos em custos compensam a utilização de técnicas como o PAE visto que, além de possibilitar bons resultados em um curto período de tempo, a empresa também já possui as licenças dos *softwares* necessários e equipe qualificada para sua utilização. Assim sendo, essa é uma prática pouco utilizada na empresa que poderia ser facilmente implementada, haja vista o trabalho realizado.

A próxima etapa seria padronizar e otimizar o *setup*, visto que o setor de rotogravura não possui procedimentos padrão para essa atividade e isso onera o sistema produtivo. Esse

problema já foi identificado e treinamentos sobre Troca Rápida de Ferramentas já estão sendo realizados. Assim, equipes estão sendo formadas para executar um projeto com objetivo de padronizar e otimizar o *setup* das máquinas.

5. Conclusões

O tema abordado no presente artigo foi a rugosidade do cobre de uma matriz de rotogravura e teve como motivação a ampla utilização dessa técnica de impressão. O objetivo principal foi a otimização da máquina de polimento com a utilização do PAE. O estudo se mostrou importante, pois o polimento de cobre somente foi abordado em trabalhos sobre a produção de *wafers* utilizados na indústria de semicondutores.

A elaboração do roteiro de estudo iniciou-se a partir de informações coletadas do fabricante da máquina e dos colaboradores que a operam. A seguir, foram identificadas quatro variáveis de entrada e seus respectivos níveis (altos e baixos). Feito isso, os experimentos foram organizados e divididos em dois processos sequenciais: um para cada rebolo de polimento. O Processo 1 corresponde ao rebolo de 1000 granas, que é responsável pelo desgaste; o Processo 2 corresponde ao rebolo de 2000 granas, que é responsável pelo acabamento. A análise dos resultados validou o roteiro proposto e originou o ajuste ótimo com os valores dos parâmetros de entrada para cada um dos dois experimentos. Esse resultado tem impacto direto na produtividade do setor de impressão da empresa, visto que retrabalhos devido à rugosidade do cobre fora de especificação não mais acontecem.

No que diz respeito a melhorias do roteiro, deve-se ter atenção com os fatores de ruído e com o instrumento de medição. Sobre os fatores de ruído, deve-se atentar à possibilidade de imantação do cilindro devido ao atrito do rebolo na superfície revestida com cobre e levar esse fator em consideração em estudos futuros. Quanto aos resultados dos R^2 , poderiam-se obter melhores resultados se as medições fossem coletadas com um rugosímetro óptico, o que confere maior precisão. É interessante que esse aparelho seja utilizado em estudos futuros.

Além disso, constatou-se que são escassos os trabalhos acerca da produção de matrizes para a técnica de impressão de rotogravura. Portanto, o PAE pode ser utilizado para otimizar todos os outros processos relacionados a essa técnica. Como o processo de polimento do cromo utiliza a mesma máquina e parâmetros de entrada, esse pode ser o alvo de um estudo futuro com a utilização do roteiro aqui proposto. No entanto, os estudos não se devem limitar somente ao processo de polimento, mas também devem focar a descromagem, o corte, o desengraxe, o aumento e a cromagem de cilindros.

REFERÊNCIAS

ANTONY, J. **Some Key Things Industrial Engineers Should Know About Experimental Design**. Logistics Information Management, v.11, n.6, p. 386-392, 1998.

CAMPOS, V. F. **TQC – Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. 8^a ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.

CROSBY, P. B. **Qualidade é investimento**. 6^a ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1994.

JURAN, J. M.; GRYNA, F. M. **Quality Planning and Analysis: From Product Development through Use**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

GRAVURE EDUCATION FOUNDATION AND GRAVURE ASSOCIATION OF AMERICA. **Gravure – Process and Technology**. 2nd ed. Rochester, 2003.

KIM, N.; CHOI, M.; KIM, S.; CHANG, E. **Design of Experiment (DOE) method considering interaction effect of process parameters for optimization of copper chemical mechanical polishing (CMP) process.** Microelectronic Engineering, n. 83, p. 506-512, 2006.

KIPPHAN, H. **Handbook of print media: technologies and production methods.** 1st ed. Berlin: Springer, 2001.

LAURSEN, T.; GRIEF, M. **Characterization and Optimization of Copper Chemical Mechanical Planarization.** Journal of Electronic Materials, v. 31, n. 10, p. 1059 – 1065, 2002.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** 5^a ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos: Série Monográfica Qualidade.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

SAKKAS, V. A.; ISLAM, Md. A.; STALIKAS, C.; ALBANIS, T. A. **Photocatalytic degradation using Design of Experiments: A review and example of the Congo red degradation.** Journal of Hazardous Materials, n. 175, p. 33-44, 2010.

SILVA, S. P. **O uso da digitalização tridimensional a Laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006

TSAO, H.-S. J.; WIBOWO, I. **A method for identifying a minimal set of test conditions in 2^k experimental design.** Computers & Industrial Engineering, v. 18, p. 141-151, 2005.

ZHANG, Q. **Quality Dimensions, Perspectives and Practices – A Mapping Analysis.** International Journal of Quality & Reliability Management, v. 18, n. 7, p. 708-721, 2001.