

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SELAGEM DE DOSÍMETROS EM CRACHÁS UTILIZANDO PROJETO DE EXPERIMENTOS

Pedro da Silva Hack

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre - RS, Brasil
pedrohack@producao.ufrgs.br

Cristine Werlang

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre - RS, Brasil
cristinewerlang@producao.ufrgs.br

Klaus Elbern

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre - RS, Brasil
kkruel@producao.ufrgs.br

Carla Schwengber ten Caten

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre - RS, Brasil
tencaten@producao.ufrgs.br

RESUMO

O trabalho tem como objetivo analisar e otimizar o processo de selagem de dosímetros em crachás plásticos em uma empresa situada na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, utilizando-se a ferramenta de Planejamento de Experimentos. Os fatores controláveis investigados foram temperatura, pressão, tempo de aquecimento e tempo de prensagem, sendo as características de qualidade avaliadas facilidade de corte e acabamento. Utilizou-se um projeto composto de segunda ordem (PCSO) que contemplou um projeto fatorial completo 2^4 e uma estrela parcial apenas no fator temperatura, pois havia suspeita de efeito quadrático deste fator. Após a realização dos experimentos foi feita uma análise de regressão múltipla para modelar o comportamento das características de qualidade em função dos fatores controláveis que possuíam efeito significativo sobre elas. Como resultado da otimização multivariada são apresentados dois ajustes ótimos dos fatores controláveis, um priorizando qualidade e outro custo do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto de Experimentos, Otimização de Processos, Regressão Múltipla.

Área principal: Estatística

ABSTRACT

The paper aims to analyze and optimize the process of sealing of dosimeters inside plastic badges in a company located in the metropolitan region of Porto Alegre, Rio Grande do Sul, applying the tools of Design of Experiments (DOE). The controllable factors used were temperature, pressure, heating time and pressing time, being quality characteristics the ease of cut and finishing. A second order complete project (SOCP) was used, contemplating a complete factorial 2^4 project and a partial star only in the temperature factor, due to a suspect of quadratic effect. After the experiments were run, a multiple regression analysis was made to model the behavior of the quality characteristics according to the controllable factors that had significant effects on these characteristics. Two optimum setups were presented as the result of the multivariable optimization, one prioritizing quality and the other the process costs.

KEYWORDS: Design of Experiments, Process Optimization, Multiple Regression.

Main Area: Statistics

1. Introdução

Na área de prestação de serviços em radiologia, é necessário determinar os níveis de radiação a que os funcionários são expostos, de acordo com a Portaria 453/98 do Ministério da Saúde. Uma das técnicas utilizadas para monitorar a exposição à radiação é a selagem de dosímetros (medidores de radiação) dentro dos crachás plásticos de identificação desses funcionários.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi estudar o processo de selagem de dosímetros em crachás de identificação em uma empresa situada na região metropolitana de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, e avaliar quais dos parâmetros desse processo tem efeito significativo sobre as características finais da qualidade do produto. O trabalho se propõe a analisar os efeitos individuais desses parâmetros e identificar os ajustes ótimos para que maximizar o desempenho das características da qualidade e reduzir o custo do processo.

Para atingir esse objetivo foi realizado um projeto de experimento, ou *Design of Experiments* (DOE), que é uma metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento (RIBEIRO & CATEN, 2000),

O planejamento de experimentos combinado com a análise de regressão múltipla pode ser aplicado à modelagem do comportamento da característica de qualidade em função dos parâmetros de processo controlados durante o experimento, sem que seja necessário realizar um grande número de ensaios (ARBIZU & PÉREZ, 2003).

Os fatores controláveis investigados no estudo foram temperatura, pressão, tempo de aquecimento e tempo de prensagem, sendo as características de qualidade avaliadas facilidade de corte e acabamento. Utilizou-se um projeto composto de segunda ordem (PCSO) que contemplou um projeto fatorial completo e uma estrela parcial apenas no fator em que havia suspeita de efeitos não lineares. Após a realização dos experimentos foi feita uma análise de regressão múltipla das características de qualidade, onde foram verificados quais os fatores controláveis que possuíam efeito significativo sobre as mesmas. Na sequência é realizada uma otimização multivariada considerando o mesmo peso relativo para as duas características de qualidade. São apresentados dois ajustes ótimos dos fatores controláveis, um priorizando qualidade e outro custo do processo.

A seção 2 apresenta uma revisão sobre projeto de experimentos, a seção 3 uma descrição do processo de selagem, seguida pela seção 4, que detalha o planejamento do experimento realizado. A seção 5 descreve a regressão múltipla e a seção 6 a otimização multivariada.

2. Projeto de Experimentos

Segundo Montgomery (1997), os experimentos são utilizados em todos os campos do saber para descobrir informações a respeito de processos, produtos ou sistemas. O uso de Projeto de Experimentos pode gerar como resultado produtos e processos com maior confiabilidade, maior durabilidade e menor custo, identificando o conjunto de parâmetros que são mais importantes para o processo e determina quais os níveis em que devem ser ajustados esses parâmetros para se atingir o nível ótimo da variável de resposta (ANTONY, 2002).

O experimento projetado ou planejado trata-se de um teste ou uma série de testes nos quais são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas respostas ou dados de saída. O projeto de experimentos é de vital importância para as empresas que necessitam demonstrar um alto grau de competitividade. É impossível que se controle um determinado processo sem conhecer as suas variáveis e sem saber exatamente como elas interferem no resultado final. A execução de um projeto de experimentos tem como objetivo (WERKEMA & AGUIAR, 1996): (i) determinar as causas que mais influenciam o efeito de interesse do produto ou do processo; (ii) determinar a melhor faixa para os parâmetros de processo que são controlados no experimento, onde se obtenha melhor desempenho para um conjunto de variáveis de resposta de interesse; e (iii) determinar a faixa de ajuste dos parâmetros de processo que minimiza a ação dos fatores de ruído sobre as variáveis de resposta.

Segundo Bargigli *et al.* (2004), as principais vantagens do projeto de experimentos sobre a abordagem tradicional um-fator-de-cada-vez são: (i) maior informação por experimento. (ii) redução no número e custo de experimentos; (iii) torna possível o cálculo de interações entre as variáveis estudadas e; (iv) facilita a determinação das condições necessárias para melhorar o processo.

Nos experimentos realizados na indústria é comum encontrar a necessidade de estudar o efeito de

um ou mais fatores e, segundo Montgomery (1997), os projetos fatoriais são os mais econômicos nesses casos. Eles permitem investigar todas as possíveis combinações para os níveis de um fator simultaneamente, possibilitando verificar o efeito principal do fator e o efeito de interações mútuas entre fatores sobre a variável de resposta (GUNASEGARAM *et al.*, 2009).

2.1. Projetos Fatoriais do Tipo 2^k e PCSO

Um experimento fatorial que contempla k fatores (variáveis independentes), cada um deles com dois níveis (alto e baixo), é denominado de projeto fatorial 2^k , no qual os níveis podem ser quantitativos ou qualitativos. Os projetos fatoriais 2^k são indicados quando há muitos fatores a serem investigados e são muito utilizados nos estágios iniciais de pesquisa. É importante ressaltar que no uso dos projetos fatoriais 2^k pressupõe-se que a variável de resposta apresentará um comportamento linear na região investigada, mas não é necessária uma linearidade perfeita para que um projeto 2^k funcione bem. Um ponto central pode ser introduzido no projeto para se testar a hipótese de falta de linearidade da variável de resposta.

Para modelos quadráticos, é recomendado o uso de um Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO). Ele é constituído de um projeto 2^k acrescido de uma estrela e pontos centrais (RIBEIRO & CATEN, 2000). Sua construção consiste de três partes:

- Uma parte fatorial, ou seja, 2^k vértices de um “cubo” k dimensional (ou uma fração desses vértices) com coordenadas $\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1$;
- 2^k vértices com coordenadas, $(\pm\alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm\alpha)$ de um “cubo” k dimensional; e
- n_0 pontos centrais, com coordenadas $(0, 0, \dots, 0)$.

O termo estrela é utilizado para identificar os pontos entre os vértices do “cubo”. Para se obter uma avaliação mais precisa da variância experimental, o projeto pode contemplar repetições do ponto central, o que irá aumentar os graus de liberdade do termo de erro.

O valor de α é definido pelo experimentador, e esse pode ser definido de maneira a apresentar algumas propriedades interessantes, como rotacionalidade e ortogonalidade (RIBEIRO & CATEN, 2000). Um projeto rotacional assegura a mesma precisão nas estimativas de Y em todos os pontos do espaço amostral, enquanto um projeto ortogonal garante que os coeficientes dos fatores não se alterem no caso de algum dos fatores seja retirado do modelo.

2.2. Análise de Regressão Múltipla

A análise de regressão gera um modelo matemático que representa o relacionamento existente entre as variáveis de entrada e de saída de um processo ou produtos, através do processamento das informações contidas em um conjunto de dados.

Uma equação de regressão linear múltipla envolve mais de uma variável explicativa ou regressora, o que é mais usual, pois na maioria dos casos as variáveis de resposta estão relacionadas com k variáveis independentes. O adjetivo linear em análise de regressão linear múltipla é utilizado para indicar que o modelo é linear nos parâmetros $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$, e não porque y é função linear dos x 's (PIZZOLATO, 2002). A equação a seguir expressa a relação entre a variável dependente e duas ou mais variáveis independentes.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

A proporção da variância total na variável de resposta pode ser explicitada pelo modelo de regressão através do coeficiente de determinação R^2 , que pode variar entre 0 e 1.

De acordo com Montgomery (2001), é possível aumentar o valor de R^2 por meio da adição de novas variáveis explicativas ao modelo, porém nem sempre o novo modelo será melhor que o anterior. Para contornar esse problema é usual utilizar o coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} :

$$R^2_{aj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (2)$$

Onde n é o número de observações e p é o número de variáveis regressoras mais um. Montgomery (2001) ainda coloca que se R^2 e R^2_{aj} forem muito diferentes existe a possibilidade de

fatores não-significativos estarem no modelo, ou seja, pode-se afirmar que há um excesso de variáveis.

3. Processo de Selagem de Dosímetros

A empresa na qual foi realizado o estudo produz dosímetros que auxiliam no controle da radiação a usuários diariamente expostos. Esses dosímetros são similares a crachás de identificação, porém possuem dispositivos que acumulam a radiação para posteriormente serem medidos, monitorando o nível de radiação de cada funcionário.

O processo de selagem desses dosímetros frequentemente gera produtos com não-conformidades e a empresa geralmente trabalha com *setups* sub-ótimos, preocupando-se apenas em garantir que não haja desperdício de matéria-prima com um nível mínimo de qualidade.

O crachá é composto por duas camadas de polímeros, a primeira rígida e já moldada para que seja inserida a plaqueta de identificação, e a outra flexível. A camada flexível é prensada e aquecida para que se fixe permanentemente à camada rígida, permitindo assim a vedação do crachá com a plaqueta dentro. A montagem das camadas plásticas e da plaqueta está apresentada na Figura 1.



Figura 1 - Montagem das Camadas Plásticas e Crachás Acabados

A máquina seladora é composta por uma prensa aquecida eletricamente que solda e sela as camadas plásticas. Ela possui regulagens em níveis contínuos de temperatura, tempo de aquecimento, pressão e tempo de prensagem. Estas variáveis podem alterar o tipo de selagem, influenciando tanto na solda quanto na aparência e facilidade de corte.

4. Planejamento do Experimento

Foi escolhido um projeto composto de segunda ordem contemplando um projeto fatorial 2^4 completo que permite estudar efeitos principais e interações entre os fatores. E como se suspeitava da existência um efeito quadrático do fator temperatura, foi adicionada uma estrela parcial apenas a esse fator para avaliar efeitos não-lineares, fixando-se todos os demais fatores no nível central. Na estrela foram realizadas duas repetições para aumentar a força estatística dos resultados. Os níveis α da estrela parcial do fator temperatura foram calculados para assegurar rotacionalidade e ortogonalidade, resultando em $\pm 1,5$.

Os níveis dos fatores controláveis e seus respectivos níveis codificados estão apresentados na Tabela 1. Os níveis dos fatores controláveis foram baseados nos intervalos mais utilizados pelos operadores.

Fator	Fatores controláveis	Níveis					Unidade
		-1,5	-1	0	1	1,5	
A	Tempo de Prensagem	-	3	5	7	-	Segundos
B	Pressão	-	70	80	90	-	Psi
C	Tempo de Aquecimento	-	0	1	2	-	Segundos
D	Temperatura	5	5,5	6	6,5	7	Níveis

Tabela 1 - Fatores Controláveis e seus respectivos níveis

Na análise dos produtos, as duas características de qualidade avaliadas foram a facilidade de corte (destacamento do molde) e o acabamento da selagem no produto final. Como ambas as características de resposta são qualitativas, foi necessário converter as opiniões dos analistas em valores quantitativos, para que pudesse ser feita a regressão. Para tanto, foi requerido aos analistas que atribuíssem uma nota de 0 a 10 para cada um dos experimentos realizados, sendo 0 um produto inutilizado e 10 o melhor produto possível.

A ordem de execução dos experimentos foi aleatorizada. Foram mantidos constantes a matéria prima, a máquina, o dia e o operador. Os crachás confeccionados foram entregues ao responsável por destacá-los do molde, sem que ele soubesse qual tratamento havia sido utilizado, para que ele avaliasse cada uma das características de qualidade. Para cada tratamento, foram confeccionados seis crachás, e a nota final de cada característica foi composta pela média aritmética das avaliações dos seis crachás.

Para avaliar cada crachá produzido, foram criadas duas variáveis de resposta correspondentes às características da qualidade: acabamento (Y_1) e facilidade de corte (Y_2). O acabamento inclui desde crachás com selagem pobre, que acabam necessitando de retrabalho ou sendo descartados, até crachás com o polímero queimado, os quais são inutilizados totalmente. A facilidade de corte influencia diretamente no tempo necessário para que o operador destaque cada crachá do molde, visto que nas melhores situações o crachá já deixa o processo de selagem destacado do molde pela própria máquina. De acordo com a empresa, ambas as características são igualmente importantes no resultado final.

5. Regressão Múltipla

As características de qualidade avaliadas no experimento estão apresentadas na Tabela 2.

A	B	C	D	Y1	Y2
-1	-1	-1	1	0,00	0,00
-1	-1	1	-1	0,00	0,08
-1	1	-1	-1	0,00	0,00
-1	1	1	1	1,92	0,33
-1	-1	-1	-1	0,00	0,00
-1	-1	1	1	1,21	0,00
-1	1	-1	1	0,75	0,00
-1	1	1	-1	0,00	0,00
0	0	0	-1,5	0,00	0,08
0	0	0	-1,5	0,00	0,00
0	0	0	0	1,75	1,25
0	0	0	0	0,25	0,25
0	0	0	1,5	8,17	9,67
0	0	0	1,5	7,50	7,29
1	-1	-1	-1	0,00	0,00
1	-1	1	1	6,17	3,67
1	1	-1	1	9,83	9,50
1	1	1	-1	0,00	0,00
1	-1	-1	1	9,83	9,33
1	-1	1	-1	7,83	7,17
1	1	-1	-1	0,00	0,25
1	1	1	1	9,83	9,83

Tabela 2 - Resultados das características de qualidade

Foi rodada uma regressão múltipla de cada característica de qualidade individualmente em função dos fatores controláveis codificados apresentados na Tabela 1. O modelo definitivo foi obtido por um processo iterativo onde os efeitos principais e efeitos de interações não significativos foram removidos da regressão até que fosse obtido o melhor valor de R^2 ajustado, adotando-se uma confiança de 10%.

Para a análise de Y_1 (acabamento), os coeficientes dos fatores significativos e as estatísticas do modelo de regressão estão apresentados respectivamente nas Tabelas 3 e 4.

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	2,957	0,507	5,836	0,000
A	2,476	0,594	4,168	0,001
D	1,202	0,475	2,529	0,022
BCD	1,497	0,594	2,520	0,022
ABCD	1,982	0,594	3,337	0,004

Tabela 3 – Coeficientes do modelo de regressão de Y_1 (acabamento)

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,842
R-Quadrado	0,708
R-quadrado ajustado	0,640
Erro padrão	2,376
Observações	22

Tabela 4 - Estatísticas do modelo de regressão de Y_1 (acabamento)

Com os coeficientes da Tabela 3, pode-se gerar o modelo de regressão da característica de qualidade Y_1 (acabamento) em função dos fatores controláveis apresentado na equação 3. Como se pode verificar na Tabela 4, o modelo de regressão explica 70,8% da variabilidade da característica de qualidade Y_1 (acabamento).

$$Y_1 = 2,957 + 2,476 \cdot A + 1,202 \cdot D + 1,497 \cdot BCD + 1,982 \cdot ABCD \quad (3)$$

Para o estudo de Y_2 (facilidade de corte) novamente foi realizado um processo iterativo de remoção dos fatores não significativos. Os coeficientes dos fatores significativos do modelo de regressão final e as estatísticas do modelo de regressão estão apresentados respectivamente nas Tabelas 5 e 6.

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	2,668	0,581	4,589	0,000
A	2,458	0,682	3,606	0,002
D	1,092	0,545	2,002	0,061
BCD	1,542	0,682	2,261	0,037
ABCD	1,573	0,682	2,307	0,034

Tabela 5 - Coeficientes do modelo de regressão de Y_2 (facilidade de corte)

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,786
R-Quadrado	0,618
R-quadrado ajustado	0,528
Erro padrão	2,727
Observações	22

Tabela 6 - Estatísticas do modelo de regressão de Y_2 (facilidade de corte)

Com os coeficientes da Tabela 5, pode-se gerar o modelo de regressão da característica de qualidade Y_2 (facilidade de corte) em função dos fatores controláveis apresentado na equação 4. Como se pode verificar na Tabela 6, o modelo de regressão explica 61,8% da variabilidade da característica de qualidade Y_2 .

$$Y_2 = 2,668 + 2,458 \cdot A + 1,092 \cdot D + 1,542 \cdot BCD + 1,573 \cdot ABCD \quad (4)$$

6. Otimização multivariada

Na otimização multivariada considerou-se que cada característica de qualidade possuía o mesmo peso relativo na composição da qualidade final do produto. Foi gerado um modelo de regressão final apresentado na equação 5 considerando-se o mesmo peso relativo para os modelos de regressão das características da qualidade individuais apresentados nas equações (3) e (4).

$$Y = 2,813 + 2,467 \cdot A + 1,147 \cdot D + 1,520 \cdot BCD + 1,778 \cdot ABCD \quad (5)$$

Como na análise de regressão foram utilizados os níveis codificados, é possível comparar os coeficientes dos fatores controláveis do modelo de regressão. Como se pode verificar na equação 5, conclui-se que no intervalo investigado, apenas os fatores controláveis Tempo de Prensagem (A) e Temperatura (D) apresentaram efeito principal significativo. Apesar dos fatores principais Pressão (B) e Tempo de Aquecimento (C) não terem sido considerados significativos, o efeito de interação desses fatores foi considerado significativo, fazendo com que o nível definido para esses fatores afete a qualidade do produto final.

Os coeficientes de todos os fatores são positivos, demonstrando que o aumento dos fatores principais tem um efeito positivo na percepção de qualidade observada, para os intervalos utilizados no experimento. O coeficiente do fator temperatura (D) é menor do que os demais fatores, o que é bom para reduzir os custos do processo, visto que a prensa é aquecida através de resistências que consomem muita energia elétrica.

A partir do modelo de regressão final apresentado na equação 5, o ajuste dos fatores controláveis que maximizaria a qualidade seria definir todos os fatores controláveis no nível alto (1). Porém os custos com energia aumentam quanto maiores forem os níveis dos fatores controláveis, em especial com o fator temperatura.

A opção para reduzir os custos com energia seria ajustar o fator temperatura e/ou os fatores não significativos no nível baixo (-1) e compensar nos demais fatores para tornar os efeitos de interação positivo.

Os ajustes ótimos para os fatores controláveis do processo de acordo com a equação 5, priorizando qualidade e custos estão apresentados na Tabela 7.

Fatores	Priorizando Custo		Priorizando Qualidade	
	Níveis Codificados	Níveis Reais	Níveis Codificados	Níveis Reais
Tempo de Prensagem (A)	1	7 Segundos	1	7 Segundos
Pressão (B)	-1	70 Psi	-1	70 Psi
Tempo de Aquecimento (C)	1	2 Segundos	-1	0 Segundo
Temperatura (D)	-1	Nível 5,5	1	Nível 6,5
Qualidade	7,4		9,7	

Tabela 7 - Ajustes ótimos para o processo considerando custo e qualidade

Como se pode verificar na Tabela 7, o ajuste ótimo priorizando custo seria tempo de prensagem 7 segundos (1), pressão 70 psi (-1), tempo de aquecimento 2 segundos (1) e temperatura 5,5 (-1), o que acarretaria em uma avaliação de qualidade do produto de 7,4. O ajuste ótimo priorizando qualidade seria tempo de prensagem 7 segundos (1), pressão 70 psi (-1), tempo de aquecimento 0 (-1) e temperatura 6,5 (1), o que acarretaria em uma avaliação de qualidade do produto de 9,7.

7. Conclusões

O objetivo do trabalho foi avaliar quais fatores controláveis possuem efeito significativo sobre as características de qualidade acabamento (Y_1) e facilidade de corte (Y_2) no processo de selagem de dosímetros em crachás plásticos e identificar o ajuste ótimo dos fatores de forma a maximizar qualidade e reduzir custos.

O estudo foi realizado em uma empresa situada na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, utilizando-se a ferramenta de Planejamento de Experimentos. Os fatores controláveis investigados foram temperatura, pressão, tempo de aquecimento e tempo de prensagem. Utilizou-se um projeto composto de segunda ordem (PCSO) que contemplou um projeto fatorial completo 2^4 e uma estrela parcial apenas no fator temperatura, pois havia suspeita de efeito quadrático deste fator.

Após a realização dos experimentos foi feita uma análise de regressão múltipla para modelar o comportamento das características de qualidade em função dos fatores controláveis que possuíam efeito significativo sobre as mesmas. Com os modelos de regressão para cada característica de qualidade, pode-se concluir que no intervalo investigado, apenas os fatores controláveis tempo de prensagem e temperatura apresentaram efeito principal significativo. Eles apresentaram um efeito positivo sobre as características de qualidade, indicando que quanto maior o nível do fator controlável, maior será a qualidade final do produto. O fator com maior efeito sobre as características de qualidade foi o tempo de prensagem, contrariando a ideia inicial de que a temperatura seria o principal fator determinante da qualidade. Considerando-se o intervalo estudado, não foi possível concluir que a temperatura tivesse um efeito quadrático.

Na sequência, foi realizada uma otimização multivariada considerando-se o mesmo peso relativo para as duas características de qualidade. Foram identificados dois ajustes ótimos para o processo, um priorizando maximizar a qualidade do produto e outra priorizando reduzir custos da produção.

Como o objetivo principal da empresa era maximizar a qualidade, conclui-se que o ajuste ótimo para o processo de selagem de dosímetro foi tempo de prensagem 7 segundos, pressão 70 psi, tempo de aquecimento 0 segundo e temperatura 6,5, o que acarretaria em uma avaliação de qualidade do produto de 9,7.

8. Referências

- Antony, J.** (2002), Training for design of experiments using a catapult, *Quality Reliability Engineering International*, 18, 29–35.
- Arbizu, I.P. e Pérez, C.J.L.** (2003), Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning process. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 390-396.
- Bargigli, S. M., Raugei, Ulgiati, S.** (2004), Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes, *Energy*, 29, 2145–2159.
- Gunasegaram, D.R., Farnsworth, D.J., Nguyen, T.T.** (2009), Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1209–1219.
- Montgomery, D. C.** *Diseño y Análisis de Experimentos*. Mexico, DF: Grupo Ed. Iberoamérica, Traduzido por Lic. Jaime Delgado Saldivar, 1991.
- Montgomery, D. C.** *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley and Sons, 5ª. Ed., 1997.
- Montgomery, D. C.** *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. Rio de Janeiro: LTC, 4ª. Ed., 2001.
- Pizzolato, M.** *Método de Otimização Experimental da Qualidade e Durabilidade de Produtos: Um Estudo de Caso em Produto Fabricado por Injeção de Plástico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Program de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.
- Ribeiro, J. L. D. e Caten, C. S.** *Projeto de Experimentos: Série Monográfica Qualidade*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
- Werkema, M. C. C. e Aguiar, S.** *Otimização Estatística de Processos: Como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria*. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996, v. 9.