

MELHORIA DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO DE PEÇAS DE GRANDE PORTE EM AÇO FUNDIDO UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Luís Gustavo Macêdo Ribeiro ¹

Luiz Henrique Dias Alves ²

Messias Borges Silva ³

Resumo

Associado ao processo de fabricação de uma peça em aço fundido, verifica-se uma variedade de defeitos que podem estar relacionados isoladamente a uma etapa do processo, tal como: projeto da peça, insumos utilizados, areias, tintas e materiais de moldagem, metal, vazamento, solidificação, tratamento térmico e acabamento. Ou relacionados a várias etapas do processo que em conjunto podem causar um defeito. Dentre os principais defeitos identificados em um fundido destaca-se a escama, que, de maneira geral, trata-se de áreas protuberantes, habitualmente porosas, com uma camada de areia abaixo da superfície do metal. Na busca de uma solução para caracterização das causas reais de ocorrência do defeito foi proposto que se empregasse a metodologia do “Planejamento de Experimentos”. Foram definidas as principais variáveis de processo que poderiam estar influenciando na ocorrência do defeito. Em seguida, montou-se a matriz de experimentos a dois níveis e realizaram-se os experimentos. Após realizados os experimentos, definiu-se as variáveis de maior importância. Com base nestas variáveis propôs-se um modelo para prever a ocorrência do defeito. A aplicação do modelo mostrou-se eficaz na solução do problema

Palavras-chave: Planejamento; Escama; Aço fundido.

STEEL CASTING QUALITY IMPROVEMENTS USING EXPERIMENT'S DESIGN FOR HEAVY PARTS PRODUCTION

Abstract

Associated to the foundry process to produce steel castings parts, there are a lot of defects which can be related separately to a process stage, casting design, raw material and other molding material, steel, pouring, solidification, heat treatment and cleaning, or related to some process stages that together can cause a specific defect. Among the main defects identified in a casting, it can be listed the scab or expansion scab. Searching for a solution in order to identify the actual causes of occurrence of the defect, the use of an Experiment Design was proposed. The main variables in the process that could be influencing the occurrence of the defect were defined. Subsequently, a two level experiment design matrix was defined and the experiments have been conducted. After the experiments have been made the most important variables have been identified. Based on these variables a model to see the occurrence of the defect was proposed. The application of the model has shown to be effective in solving the problem.

Key Words: Design of experiments; Scab; Steel casting.

1 INTRODUÇÃO

A solução de um problema ou o desenvolvimento de um produto ou processo pode ser feita de várias maneiras, tais como tentativa e erro, variar um fator de cada vez, aproximações sucessivas, ou através de metodologias com base na estatística, que podem permitir redução de tempo de desenvolvimento ou solução do problema com respectiva redução do custo. Dentre essas

metodologias, o planejamento de experimentos vem se destacando como uma ferramenta de muita eficiência (são exemplos fatorial completo, fatorial fracionado e Método de Taguchi).

Grandes organizações, como Motorola, Toyota, dentre outras, vem obtendo sucesso com comprovada qualidade aplicando essas metodologias.

¹ Engenheiro de Produção.

² Engenheiro Metalúrgico, Mestre em Engenharia Mecânica, Doutorando do Curso de pós graduação da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG-UNESP, Professor do curso de Tecnologia Mecânica das Faculdades Integradas de Cruzeiro, Gerente de Produção da Amsted Maxion Fundação e Equipamentos Ferroviários S.A. Rua Vereador Guilherme Henrique Turner, 111. Vilage Nesralla Rubez. 12710-520 - Cruzeiro, SP (luizhenrique@amsted-maxion.com.br)

³ Engenheiro Químico, Doutor em Engenharia, Professor da Escola de Engenharia Química de Lorena - USP, Professor do Curso de Engenharia de Produção da FEG-UNESP

Desta forma, escolheu-se o Planejamento de Experimentos como uma ferramenta para orientar na solução de um problema de fundição que ocorre, normalmente, associado à expansão da areia de sílica quando esta ultrapassa temperatura de 870°C passando a tridimita, verifica-se um aumento de volume em torno de 2%.⁽¹⁾ Como a areia está comprimida, ela não tem para onde expandir e acaba crescendo para dentro da cavidade do molde. Esta parte que cresce não o faz homoganeamente. Algumas áreas mais expostas à radiação se aquecem mais e, conseqüentemente, expandem mais. Regiões com maior tendência a apresentar expansão são as planas e que ficam expostas por mais tempo à radiação. As escamas tem aparência de uma fina placa de metal com mau acabamento, estando visivelmente destacada da superfície do fundido.⁽¹⁾

Aplicou-se o Planejamento de Experimentos com objetivo de identificar quais as variáveis que mais contribuem para o aparecimento de escama, tornando assim mais rápido e menos oneroso o processo de solução de problemas nessa peça, e que, provavelmente, contribuirá para a solução do mesmo problema em outras peças produzidas na fundição da Amsted-Maxion.

1.1 O Planejamento de Experimentos

Muitas situações experimentais requerem que se observe o efeito da variação de dois ou mais fatores. Mostra-se que para uma exploração completa de tal situação não é suficiente variar um fator de cada vez, mas sim que todas as combinações dos níveis diferentes do fator devem ser examinadas, a fim de esclarecer o efeito de cada fator e as maneiras possíveis em que o fator pode ser modificado pela variação dos outros.

As experiências realizadas por químicos, físicos, e engenheiros, sejam no laboratório ou planta, pretendem, geralmente, determinar os efeitos de um ou mais fatores no rendimento ou na qualidade de um produto, o desempenho de um instrumento de medição ou máquina, a resistência de um material ao ataque químico, o consumo de combustível de um processo, e assim por diante. Um caminho para se montar estes experimentos é escolher um conjunto de valores, ou de níveis, formado pelos valores máximos e mínimos de cada um dos fatores a ser estudado, e experimentar uma ou mais interações do processo com cada uma das combinações possíveis dos níveis dos fatores. Tal experiência é denominada Planejamento de Experimentos, cujo objetivo é determinar como cada variável e suas interações afetam o seu processo.⁽²⁻⁴⁾

1.2 Experimentos Fatoriais

Muitas situações experimentais requerem que se observe o efeito da variação de dois ou mais fatores. Mostra-se que para uma exploração completa de tal situação não é suficiente variar um fator de cada vez, mas sim que todas as combinações dos níveis diferentes do fator devem ser examinadas a fim de esclarecer o efeito de cada fator e as maneiras possíveis em que o fator pode ser modificado pela variação dos outros. Na análise dos resultados experimentais, o efeito de cada fator pode ser determinado com a mesma exatidão como se somente um fator tenha sido variado em um momento, e os efeitos da interação entre os fatores podem

também ser avaliados. Tal metodologia é denominada Planejamento de Experimentos.⁽²⁻⁵⁾

1.3 Experimentos com Fatores em Dois Níveis

Em geral, os planejamentos fatoriais do tipo 2ⁿ (fatoriais em dois níveis), onde n representa números de fatores, são mais simples. Por conveniência, um fator é indicado por uma letra maiúscula, e os dois níveis do fator por (-) e (+). Pela convenção (-) representa o nível inferior, e (+), o nível superior. Podemos esquematizar o planejamento na forma de matrizes de planejamento.⁽²⁻⁵⁾

1.4 Metodologia dos Fatoriais Completos

Na realização de um plano de experiência de fatorial completo executam-se todos os ensaios correspondentes às diferentes combinações possíveis.

$$N^{\circ} \text{ Exp.} = A^F \quad (1)$$

onde A = n° de níveis e F = n° de fatores

Define-se que o número de experimentos que deve ser utilizado é a menor potência de 2, que seja maior que o número de variáveis, por exemplo, se temos 5 variáveis, 2³ > 5, então teremos de fazer 8 experimentos. Encontra a necessidade de realizar repetições de alguns ensaios para que se possa estimar o erro experimental. Portanto o número de experiências efetivas é dado pela multiplicação do N.º Exp. e o N.º Repetições.⁽²⁻⁴⁾

1.5 Elaboração da Matriz

A matriz base é montada com uma coluna de N.º Exp., outra para os fatores, subdividida pela quantidade de fatores, e outra para a resposta, subdividida pela quantidade de replicações. Os níveis dos fatores são renomeados com sinais de (+) e (-) e distribuídos na matriz conforme segue:

- O primeiro fator será intercalado entre os níveis (+) e (-) até o final da coluna N.º Exp.;
- O segundo repetirá o sinal da primeira linha do primeiro fator e dobrará em função do primeiro fator, repetindo a seqüência até o final da coluna N.º Exp.;
- O terceiro repetirá o sinal da primeira linha do primeiro fator e dobrará em função do segundo fator, repetindo a seqüência até o final da coluna N.º Exp.;

- O quarto repetirá o sinal da primeira linha do primeiro fator e dobrará em função do terceiro fator, repetindo a seqüência até o final da coluna N.º Exp.; e
- E assim por diante até o último fator.⁽²⁻⁵⁾

1.6 Cálculo dos Efeitos

Os efeitos são definidos como a mudança ocorrida na resposta quando se move do nível baixo (-) para o nível alto (+), ou seja, são exatamente as quantificações da influência do fator naquela determinada resposta.⁽²⁻⁵⁾

$$E_A = \frac{y^{1(+)} + y^{2(+)} + y^{3(+)} + \dots + y^{n(+)}}{n^{(+)}} - \frac{y^{1(-)} + y^{2(-)} + y^{3(-)} + \dots + y^{n(-)}}{n^{(-)}} \quad (2)$$

onde E_A = efeito do fator A; $y^{1(+)}, y^{2(+)}, \dots, y^{n(+)}$ = respostas encontradas no nível (+); $y^{1(-)}, y^{2(-)}, \dots, y^{n(-)}$ = respostas encontradas no nível (-); $n^{(+)}$ = número de condições experimentais no nível (+); $n^{(-)}$ = número de condições experimentais no nível (-).

Para o cálculo dos efeitos das interações basta multiplicar o sinal dos efeitos que estão interagindo e esta será a resposta que se encontrará no nível (+) ou (-), de acordo com o resultado da multiplicação.⁽²⁻⁵⁾

1.7 Modelo Matemático Linear

O modelo matemático tem como objetivo prever a resposta, baseado nas informações de entrada, ou seja, das variáveis independentes ou fatores. Este modelo é regido pela seguinte equação:⁽²⁻⁵⁾

$$y = \text{Média} + \frac{EA}{2} \cdot A + \frac{EB}{2} \cdot B + \frac{EC}{2} \cdot C + \frac{EAB}{2} \cdot AB + \dots \quad (3)$$

onde y = resposta; Média = média final dos experimentos; E_A, E_B, E_C, E_{AB} = efeito dos fatores e interações; A, B, C = valor registrado no experimento; $A^{\text{médio}}, B^{\text{médio}}, C^{\text{médio}}$ = a média do fator dentro da faixa definida nos níveis.

1.8 Análise da Contribuição

Pode acontecer de muitas variáveis estarem envolvidas, e, freqüentemente, algumas dessas variáveis não exercem muita influência no resultado final, sendo assim, pode-se utilizar análise das Variâncias ou a análise da contribuição, para saber quais realmente influenciam. O cálculo da análise de contribuição C_i é mostrado na Equação 5:⁽²⁻⁵⁾

$$T = \sum (E_i)^2 \quad (4)$$

$$C_i = (E_i^2 / T) \cdot 100 \quad (5)$$

C_i = contribuição do fator; e E_i = efeito do i -ésimo fator.

1.9 Variável de Código (Z)

As matrizes de experimentos são codificadas. Desta forma os efeitos são calculados utilizando variáveis de código. Logo, após calculado o modelo predictor, o mesmo deve ser decodificado. Para tal, utiliza-se a Equação 6.^(4,5)

Será utilizada para decodificar o Modelo ou Predictor, mais adiante.

$$ZX = \quad (6)$$

$$\frac{2X - (\text{Lim.SuperiorX} + \text{Lim.InferiorX})}{(\text{Lim.SuperiorX} - \text{Lim.InferiorX})}$$

1.10 Experimentos Fatoriais Fracionados

O experimento fatorial fracionado tem como objetivo reduzir o número de experimentos, visto que, no caso de um processo com muitas variáveis, quando se quer avaliar o efeito dessas variáveis, o número de experimentos pode ser muito grande e se tornar impraticável para um fatorial completo. Portanto, para diminuir o número de experimentos, e ainda assim obter aproximadamente o mesmo resultado no final pode-se adotar o fatorial fracionado.^(4,5)

Portanto, para diminuir o número de experimentos, e ainda assim obter aproximadamente o mesmo resultado no final, foram criadas através de alguns artifícios matemáticos, novas matrizes com um número de experimentos relativamente menor. Dentre estas, vamos analisar as Matrizes Fracionadas.

O experimento fatorial fracionado reduz o número de experimentos, pois ele faz combinações entre os fatores. Uma observação importante é que se forem feitas combinações entre 4 fatores não se pode avaliar o efeito de interações de 4ª ordem. Se forem feitas combinações entre 3 fatores não se pode avaliar o efeito de interações de 3ª ordem. Se forem feitas combinações entre 2 Fatores não se pode avaliar o Efeito de interações de 2ª Ordem.^(4,5)

1.10.1 Tipos de planejamento fatorial fracionado

- Nos fatoriais fracionados é necessário se fazer o confundimento de alguns fatores para se gerar código para outros fatores. Confundir um fator na matriz de experimentos significa multiplicar a coluna deste fator pela de um outro fator e gerar código para um terceiro fator. Em função do menor número de fatores

utilizados na multiplicação para geração de código, por exemplo, dois (A.B ou interação de 2ª ordem), três (A.B.C ou interação de 3ª ordem) ou mesmo quatro (A.B.C.D ou interação de 4ª ordem) define-se qual resolução se trabalha.^(4,5)

- Resolução III: Neste caso, não temos efeito principal confundido com efeito principal, mas temos efeito principal confundido com interação de 2ª ordem, e temos interação de 2ª ordem confundida com interação de 2ª ordem.^(4,5)
- Resolução IV: Não se verifica efeito principal confundido com efeito principal e nem com interação de 2ª ordem. Existem efeitos principais confundidos com interação de 3ª ordem.^(4,5)
- Resolução V: Nenhum efeito principal é confundido com efeito principal e nem com qualquer dos efeitos combinados de dois fatores ou três fatores (3ª ordem) e nenhum efeito de 2ª ordem é confundido com efeito de 2ª ordem.^(4,5)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A peça objeto de estudo foi uma caixa de transmissão de trator de esteira que pesa em torno de 1.860 kg produzida em aço ASTM A 27 Grau 70–36 e dimensões aproximadas de 1.500 mm x 1.500 mm x 2.000 mm. Esta peça, devido a sua geometria e complexidade, apresenta tendência à formação de escamas na parte interna superior. Para produção da peça utiliza-se areia de sílica com adição de óxido de ferro, aglomerada com resina fenólica uretânica tanto para molde quanto para macho. Os mesmos são lavados com tinta a base de zirconita álcool e secados à chama. A presença de escamas dependendo de sua intensidade pode levar ao sucateamento da peça.

Inicialmente, foi realizado um *brainstorming* com os técnicos da fundição (engenharia, qualidade e produção) para definir quais as possíveis causas do problema, e seus respectivos limites inferior e superior.

A análise levou a identificação de 13 variáveis (Tabela 1). Desta forma seria impraticável utilizar o fatorial completo, pois o

Tabela 1. Variáveis escolhidas.

Variáveis	
A	Areia de sílica regenerada com 50%
B	Temperatura de vazamento (°C)
C	Tempo de vazamento (segundos)
D	% óxido de ferro
E	Densidade da tinta
F	Álcool
G	Tempo queima da tinta após pintura (minutos)
H	Nervura
I	% parte 1 resina
J	% parte 2 resina
K	Catalisador (gramas)
L	Tempo de cama aguardando vazamento (horas)
M	Tempo de macho pronto (horas)

número de experimentos seria elevado. Sendo assim, optou-se pela utilização do fatorial fracionado, e a maior potência de 2, mais próxima de 13 é 16 (2⁴), sendo 4 o número de fatores geradores de código. Como se utilizou interações de 2ª ordem, trabalhou-se na resolução III. A Tabela 2 apresenta a matriz de experimentos codificada. Como algumas variáveis são difíceis de serem controladas por dependerem muito do homem, decidiu-se fazer duas peças em cada receita perfazendo um total de 32 experimentos. A resposta foi avaliada em termos de área de escama, sendo o valor obtido pela média das duas peças. Como forma de rastreamento, todas as peças foram moldadas com número de série.

Tabela 2. Matriz de experimentos.

Experiência	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+
3	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-
4	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-
5	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-
6	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-
7	+	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+
8	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+
9	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+
10	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+
11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
12	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-
13	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-
14	-	+	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-
15	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+
16	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o acompanhamento da moldagem, fabricação de machos, pintura e fechamento dos moldes, do vazamento e da desmoldagem das peças produzidas por cada receita, fez-se uma análise criteriosa das peças que apresentaram o defeito registrando seus números de série. Separadas as peças que apresentaram o problema levantou-se por peça a área total de defeitos, e com base nestes dados, foram extraídos os valores de área média. As áreas foram copiadas, digitalizadas através de scanner e, em seguida, calculadas utilizando software Image Pro Plus. A Tabela 3 mostra os resultados dos experimentos.

A partir dos valores das áreas, teve início o cálculo dos efeitos de cada variável na média, seguindo as instruções da Equação 2.

Tabela 3. Resultados dos experimentos.

Experiência	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	\hat{Y} (Cm ²)
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	622,45
2	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+	0
3	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-	0
4	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	0
5	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	0
6	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	384,98
7	+	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	0
8	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	0
9	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+	329,7
10	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	0
11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	0
12	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	438,87
13	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	0
-14	-	+	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	0
15	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0
16	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	0

Tendo os valores dos efeitos e da média das médias, foi possível determinar através da equação 3 o modelo matemático codificado, predictor da ocorrência de escamas e sua extensão. Este predictor é mostrado na Equação 7.

$$\hat{Y} = 111 + 8,02 \cdot ZA + 56,14 \cdot ZB + 62,875 \cdot ZC + 14,925 \cdot ZD + 14,925 \cdot ZE + 110,995 \cdot ZF - 33,19 \cdot ZG + 69,79 \cdot ZH + 21,665 \cdot ZI + 62,875 \cdot ZJ + 56,14 \cdot ZK + 21,665 \cdot ZL + 8,02 \cdot ZM \quad (7)$$

A Figura 1 apresenta graficamente as contribuições de todas as variáveis na resposta.

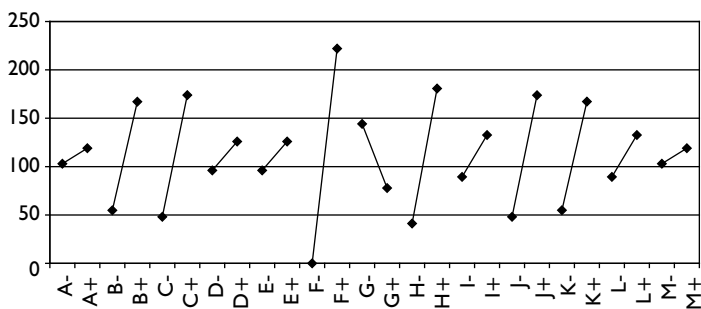


Figura 1. Gráfico das contribuições.

Porém, o modelo mostrou que existem muitos fatores interferindo no predictor. Então, foram utilizadas as Equações 4 e 5 (Análise da contribuição) para avaliar quais das variáveis serão empregadas no modelo. Definiu-se que seria utilizado no modelo somente as variáveis com contribuição acima de 3%.

Como o corte foi definido em 3%, as variáveis que entraram no modelo foram as seguintes: B, C, F, G, H, J e K.

Sendo assim, o modelo ficou como mostrado na equação 8.

$$\hat{Y} = 110,9 + 56,14 \cdot ZB + 62,875 \cdot ZC + 110,995 \cdot ZF - 33,19 \cdot ZG + 69,79 \cdot ZH + 62,875 \cdot ZJ + 56,14 \cdot ZK \quad (8)$$

A seguir, calculou-se os valores de Z, a partir da equação 6, para decodificar o modelo. O modelo decodificado é mostrado na Equação 9.

$$\hat{Y} = -10117,7 + 2,8B + 2,8C + 55,5F - 8,3G + 836,2J + 30,3K \quad (9)$$

Pelo modelo, como o objetivo é minimizar resposta "Ŷ", que é a soma das áreas da escama por peça, as variáveis B, C, F, J e K devem assumir seu limite inferior, e G, seu limite superior. As demais variáveis que não entraram no modelo assumiram seu valor médio entre superior e inferior. Após esta definição, testou-se esta receita em mais 30 peças para se certificar da eficácia do modelo. Não se verificou presença de escama em nenhuma das 30 peças. Isto permitiu validar o processo de produção conforme as orientações do modelo.

Além da avaliação prática do modelo em mais 30 peças como citado acima, foi feita a análise dos resíduos e análise de variância. Os resultados da análise de variância são mostrados na Tabela 4, onde são listados a soma dos quadrados (SQ), o grau de liberdade(GL), a soma média dos quadrados(SMQ) o teste F para verificar a significância do modelo e ainda as contribuições e o erro. A Figura 2 ilustra graficamente os resíduos do modelo calculados em relação aos resultados dos experimentos. Os valores calculados para contribuição utilizando o modelo matemático mostraram um erro admissível de 13,7% conforme mostrado na Tabela 4. Isto também é o que sugere a Figura 2, uma vez que as variações verificadas nos experimentos e as calculadas pelo modelo mostraram um comportamento semelhante. As curvas levantadas pelo experimento e a calculada pelo modelo poderiam estar mais próximas se fossem utilizadas todas as 13 variáveis estudadas.

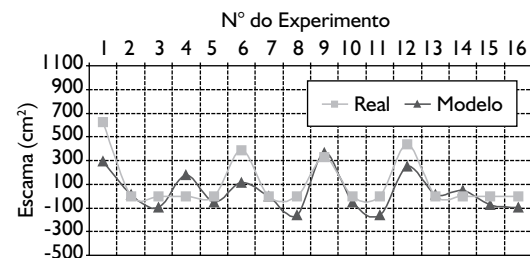


Figura 2. Análise gráfica dos resíduos.

Tabela 4. Análise de variância do modelo matemático linear calculado com base nos experimentos.

Item	SQ	GL	SMQ	Teste F	Contrib. (%)	
Modelo	486.053,1	5	97.210,6	6,3	Significante	86,3
Erro	153.768,0	10	15.376,8			13,7
Total	639.821,1	15	112.587,4			100,0

4 CONCLUSÃO

Para as condições experimentais empregadas, pode-se concluir que:

- O Planejamento de experimentos empregando fatorial fracionado pode ser uma ferramenta a ser empregada na solução de problemas de fundição;
- Com base no modelo predictor de ocorrência de defeitos de escamas levantado a partir das 32 experiências realizadas, verificou-se que:
 1. As variáveis F (Álcool), J (Percentual de parte 2 na resina), C (Tempo de vazamento), B (Temperatura de vazamento), K (Catalisador), e G (Tempo de queima da tinta após pintura) são as de maior contribuição na ocorrência de escamas, cada uma contribuindo, respectivamente com 36,2%, 11,6%, 11,6%, 9,27%, 9,27% e 3,24%, lembrando que G tem sinal negativo em seu efeito, ou seja, contribui fortemente para a redução da ocorrência de escamas.
 2. Para minimizar a ocorrência do defeito, as variáveis B (Temperatura de vazamento), C (Tempo de vazamento), F (Álcool), J (Percentual de parte 2 na

resina), e K (Catalisador) devem assumir seu limite inferior e a variável G (Tempo de queima da tinta após pintura) deve assumir seu limite superior.

3. A Variável G (Tempo de queima da tinta após pintura) deve ser maximizada para reduzir a ocorrência do defeito

- A análise de variância mostrou um erro no modelo de 13,7%, o que demonstra que o modelo pode ser empregado, uma vez que se trabalhou dentro da resolução III onde temos efeitos principais confundidos com interações de segunda ordem. Uma revisão na bibliografia mostra que para esta resolução pode ser estimada uma segurança em torno de 85%⁽⁴⁾ e o modelo mostrou 86,3%.
- A análise gráfica dos resíduos mostrou um comportamento similar entre os valores obtidos nos experimentos e os calculados pelo modelo, principalmente considerando que somente 6 variáveis fizeram parte do modelo e no total foram estudadas 13 variáveis. Desta forma, dentro dos limites estudados, pode-se utilizar o modelo como um predictor da ocorrência de escamas.

REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY. **Analysys of casting defects**. 3. ed. Des Plaines: American Foundrymen's Society Publishing, 1994. p. 32-8.
- 2 SILVA, S.S.; AZEVEDO, M.B.V. Estudo identifica variáveis críticas que definem as dimensões de peças injetadas. **Revista Plástico Industrial**, v. 62, p.90-7, out. 2003.
- 3 SILVA, S.S.; AZEVEDO, M.B.V; REKAB, K. Improve molded part quality. **Quality Progress**, v. 36, p. 72-6, Jul. 2003.
- 4 SILVA, S.S. Curso de pós-graduação. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense 2004. [Notas de aula].
- 5 AZEREDO, M.B.V. **Avaliação dos efeitos das variáveis do processo de moldagem por injeção nas propriedades de uma peça plástica utilizando planejamento de experimentos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Niteroi, 2001.

Recebido em: 8/02/07

Aceito em: 5/10/07

Proveniente de: SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO, 6., 2006, São Paulo, SP. São Paulo: ABM, 2006.