



ANÁLISE DAS VARIÁVEIS CRÍTICAS PARA O DIMENSIONAL DE UMA PEÇA PLÁSTICA MOLDADA PELO PROCESSO DE INJEÇÃO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Maurício Bagueira de Vasconcellos Azeredo, M.Sc.

Laboratórios B|Braun S.A. – Engenharia de Processo e Ferramental
Av. Eugênio Borges, 1092 – São Gonçalo – RJ – Brasil – CEP 24751-000
E-mail: azermabr@uol.com.br

Sérgio Sodré da Silva, Ph.D.

Universidade Federal Fluminense – Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica
Av. dos Trabalhadores 420 – Volta Redonda – RJ – Brasil – CEP 27260-740
E-mail: sodre@metal.eeimvr.uff.br

RESUMO: Neste trabalho utilizou-se a técnica do Planejamento Estatístico de Experimentos, como um método de análise da influência das variáveis do processo de moldagem por inje o de plásticos na especifica o dimensional de uma peça. Tomou-se como caso de estudo um componente de uso médico-hospitalar produzido por um laboratório farmacêutico. Na realiza o dos experimentos considerou-se, inicialmente, as variáveis: % de material virgem, temperatura do canhão, velocidade de inje o, tempo de resfriamento, pressão de recalque e tempo de recalque. Após análise dos dados experimentais, foi possível identificar dentre as variáveis selecionadas quais as que realmente exerciam alguma influência no dimensional da peça e quais as que não tinham nenhum efeito sobre esse parâmetro. Devido ao fato de que todas as variáveis tenham sido estudadas ao mesmo tempo, um detalhado conjunto de informa es foi obtido e estatisticamente avaliado, permitindo, assim, conhecer as rela es entre as variáveis consideradas críticas para o resultado dimensional e estabelecer melhores condi es de processo.

Palavras-chave: inje o de plásticos, análise dimensional e planejamento de experimentos.

ABSTRACT: In this work we used the Design of Experiments as experimental approach to analyze the effects of the injection molding variables on dimensional features of an injection molded part. The study was based on the injection of a medical component produced by a pharmaceutical company. During the experiments the variables % virgin row material, barrel temperature, injection speed, cooling time, holding pressure and holding time were considered. After analyzing the experimental data it was possible to identify, among the selected variables, which ones that really affect the studied part dimension and which the ones that did not have any effect on that parameter. Since all the variables have been studied at the same time, detailed information was obtained and statistically analyzed in order to understand the relationship among the critical variables and the dimensional result, as well as to establish better process conditions.

Keywords: injection molding process, dimensional analysis and design of experiments.



INTRODUÇÃO

As propriedades de uma peça moldada por injeção dependem das condições em que esta moldagem foi feita. Peças idênticas e que são fabricadas com o mesmo material, mas sob diferentes condições de injeção, certamente, se apresentarão como peças acabadas com diferentes tensões internas e diferentes níveis de contração, ocasionando variações dimensionais e diferentes acabamentos superficiais. Isto significa que se comportarão de formas distintas durante o uso ou durante os diversos processos de fabricação que se seguem após a moldagem. Portanto, o conhecimento de todas as variáveis de processo e suas implicações é de fundamental importância para a determinação da qualidade da peça injetada. Contudo, tradicionalmente, os parâmetros de injeção são determinados por pessoal experiente da área de transformação de plásticos, após um exaustivo processo de tentativa e erro, mesmo sem entender de forma precisa as variáveis que atuam no processo e de que forma estas variáveis influenciam nos resultados desejados.

O procedimento tradicional para a definição dos parâmetros de processo e sua otimização consiste em variar um parâmetro de cada vez, mantendo-se todos os outros constantes e medindo os resultados. Embora este tratamento demande tempo e seja caro, tem sido utilizado porque é de entendimento intuitivo, sem profundo conhecimento teórico e pode ser aplicado sem planejamento prévio, interrupção ou distúrbio do processo. Contudo, diante do mundo atual, altamente dinâmico e competitivo as indústrias de transformação de plásticos têm abandonado o tradicional método de tentativa e erro e adotado novas metodologias de modo a reduzir o tempo de colocação de seus produtos no mercado e garantir a sua qualidade. Dentre as diversas metodologias que têm sido utilizadas destaca-se o Planejamento de Experimentos.

O Planejamento de Experimentos consiste em uma série de testes nos quais, propositadamente, serão efetuadas mudanças nos dados de entrada de um processo (fatores), a fim de serem observadas as mudanças correspondentes nos dados de saída (resposta). Essa metodologia se tornou uma das ferramentas estatísticas mais populares dos anos 90. Na realidade ela foi originada em 1920 como um método de maximizar os conhecimentos obtidos a partir de dados experimentais, e tem evoluído nos últimos 70 anos. A recente disseminação do Planejamento de Experimentos é associada ao trabalho de Taguchi, um engenheiro Japonês, que combinou a praticidade com a perfeição da técnica matemática. Assim, cientistas, engenheiros e técnicos que não eram especialistas em matemática estão agora se tornando práticos em Planejamento de Experimentos. Desde então, muitos trabalhos experimentais foram feitos para investigar a influência dos parâmetros de processo nas propriedades das peças injetadas. Os resultados experimentais mostram que os parâmetros de injeção têm efeito significativo na qualidade das peças.

Väätäinen, Järvelä & Valta et al (1994), por exemplo, investigaram o efeito dos parâmetros de processo injeção em algumas características como contração, visibilidade das linhas de solda, visibilidade de marcas de “rechupes” e peso em diferentes peças plásticas. Yoshii, Kuramoto & Kawana et al (1996) também estudaram parâmetros estéticos de qualidade de peças injetadas, como a ocorrência de micromarcas de fluxo. Adotando o peso e o ciclo de injeção como parâmetros de produtividade das peças injetadas, Dillman, Howe & Robar (1996) utilizaram, da mesma forma, o Planejamento de Experimentos. Já Hawks, Saunders & Strong, et al (1992) e Skourlis, Mohapatra & Chassapis, et al (1997) utilizaram essa técnica para avaliar a influência dos parâmetros do processo de injeção nas propriedades mecânicas de alguns materiais plásticos. Utilizando um software para a simulação do processo de injeção, Yeung & Lau (1997) analisaram parâmetros como tempo de resfriamento do “ponto de injeção”, tensões de cisalhamento, diferencial de temperatura, contração, força de fechamento e índice de “rechupes” em função das diversas variáveis de processo pressão de injeção. Finalmente o Planejamento de Experimentos também foi utilizado por Azeredo (2001) para avaliar a influência das condições de injeção em um parâmetro de funcionalidade de uma peça.

Neste trabalho, pretende-se, então, verificar a validade das técnicas do Planejamento de Experimentos na análise dimensional de uma peça injetada.



PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para estudar a influência das variáveis do processo de injeção nas especificações dimensionais de uma peça injetada, foi utilizada nesse trabalho a injeção de um componente de uso médico hospitalar produzido por um laboratório farmacêutico. A peça escolhida é injetada em acrilonitrila butadieno estireno (ABS) em um molde de 16 cavidades e tem estreita faixa de tolerância em um de seus itens de especificação dimensional.

Antes de se iniciar a experimentação, uma análise detalhada do processo de injeção da peça foi realizada, identificando como objetivo do experimento o estudo da influência das variáveis do processo de injeção na cota de $7,53 -0,20/+0,10$ mm. Um esboço da peça estudada e a referida dimensão especificada são mostrados na figura 1 abaixo.

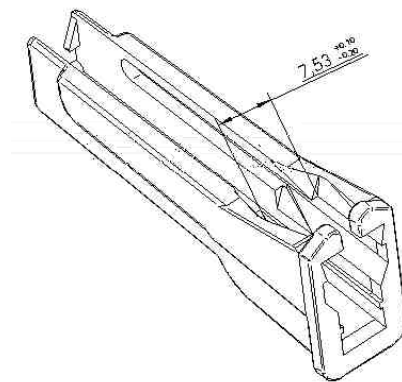


Figura 1 – Esboço do componente estudado

A referida cota foi selecionada pela dificuldade de se moldar peças dentro da tolerância especificada, com as condições atuais de processo. A faixa de tolerância especificada foi estabelecida considerando as condições de montagem e utilização do produto. Cotas abaixo da tolerância mínima ($LIE = 7,53 - 0,20 = 7,33$ mm) dificultam a montagem, por outro lado, cotas acima da tolerância máxima ($LSE = 7,53 + 0,10 = 7,63$ mm) estão sujeitas a desmontagem do produto durante a sua utilização.

Como é mostrado no gráfico da figura 2 a seguir, a média das medidas da cota selecionada ($\bar{x} = 7,64$ mm) apresentava-se no limite superior especificado. Os dados para construção do gráfico foram coletados durante um dia de produção, totalizando 220 amostras.

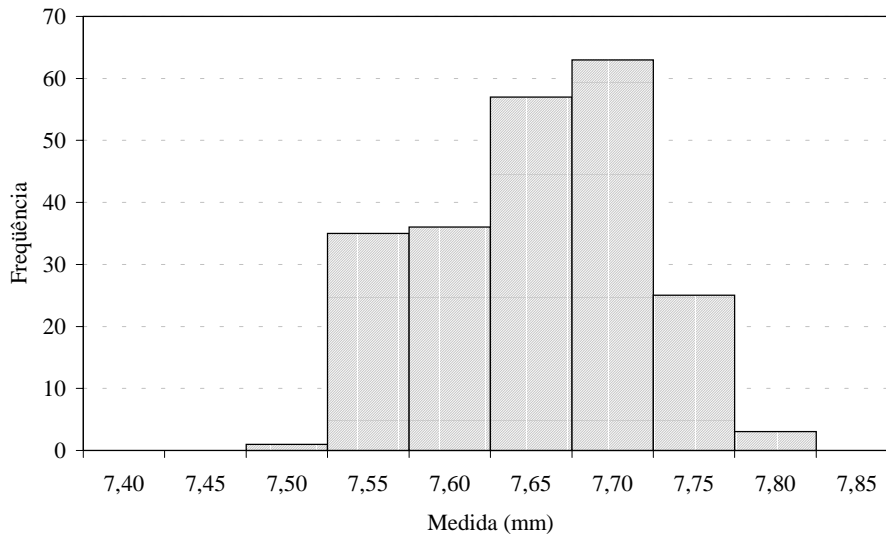


Figura 2: Gráfico de frequência dos valores encontrados para a cota de 7,53 -0,20/+0,10.

Conhecido detalhadamente o problema a ser analisado, foi possível, então, definir os fatores a serem testados, a faixa em que estes fatores deverão variar e em que nível os experimentos serão executados, conforme tabela 1. Os níveis estabelecidos para cada fator indicam os valores máximos e mínimos que cada um pode ter sem comprometimento do processo.

TABELA 1: Seleção dos fatores para análise da cota 7,53 -0,20/+0,10 mm e seus níveis de trabalho.

Descrição dos fatores	Nível inferior	Nível superior
Material virgem (%)	75	100
Temperatura do canhão (°C)	225/220/210	240/230/225
Velocidade de injeção (%)	60	98
Tempo de resfriamento (s)	4	12
Pressão de recalque (bar)	40	80
Tempo de recalque (s)	0,1	0,4

Após a seleção dos fatores e de seus níveis, o plano experimental foi definido. Na tentativa de se identificar os fatores que efetivamente exerciam maior influência na cota especificada, oito combinações dos seis fatores envolvidos, em seus dois níveis, foram elaboradas segundo um planejamento fatorial fracionado de resolução III (Montgomery, 1997), 2_{III}^{6-3} , conforme tabela 2 a seguir, e executadas as medições correspondentes para cada experimento em três repetições.

De modo a facilitar os cálculos que se seguem, os resultados dos experimentos também serão mostrados na tabela 2, juntamente com a matriz de experimentos codificada. Nesta tabela, os níveis superior e inferior de cada fator, apresentados anteriormente na tabela 1, foram codificados por +1 e -1, e os fatores D, E e F estão confundidos com as interações ABC, AB e AC, respectivamente.



TABELA 2: Matriz de experimentos codificada e as respectivas medidas para a cota estudada, obtidas para cada experimento realizado em um planejamento fatorial fracionado.

Exp. Nr.	Mat. virgem	Temp. canhão	Veloc. injeção	Tempo resf.	Press. recal.	Tempo recal.	Cota 7,53 -0,20/+0,10 mm			
	A	B	C	D	E	F	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}
1	1	1	1	1	1	1	7,64	7,64	7,63	7,64
2	-1	1	1	-1	-1	-1	7,47	7,45	7,46	7,46
3	1	-1	1	-1	-1	1	7,43	7,43	7,44	7,44
4	-1	-1	1	1	1	-1	7,62	7,64	7,62	7,63
5	1	1	-1	-1	1	-1	7,38	7,28	7,31	7,32
6	-1	1	-1	1	-1	1	7,68	7,68	7,68	7,68
7	1	-1	-1	1	-1	-1	7,65	7,64	7,64	7,65
8	-1	-1	-1	-1	1	1	7,25	7,33	7,30	7,29

A partir dos resultados encontrados na tabela 2 acima, foi realizada uma análise quantitativa e gráfica a fim de identificar os fatores críticos para cota estudada.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Análise quantitativa

Com base nos resultados encontrados nos experimentos da tabela 2, foram determinados, para cada fator, a resposta média nos níveis superior e inferior, e seu efeito sobre a cota especificada. Os resultados são mostrados na tabela 3, a seguir:

TABELA 3: Resposta média nos níveis de trabalho e o efeito para cada fator na cota especificada.

Fatores	Resposta média		Efeito
	Nível inf.	Nível sup.	
A	7,51	7,51	0,00
B	7,50	7,52	0,02
C	7,48	7,54	0,06
D	7,38	7,65	0,27
E	7,55	7,47	-0,08
F	7,51	7,51	0,00

Como foram utilizados experimentos com repetição, a análise de variância, ANOVA, foi utilizada para determinar quais os fatores que realmente exercem alguma influência nesse parâmetro.

A ANOVA é mostrada na tabela 4, a seguir:



TABELA 4: ANOVA para análise dos fatores críticos para a dimensão especificada.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F ₀
A	0,0001	1	0,0001	0,17
B	0,0034	1	0,0034	5,67
C	0,0175	1	0,0175	29,17
D	0,4354	1	0,4354	725,67
E	0,0433	1	0,0433	72,17
F	0,00001	1	0,00001	0,02
Residual	0,0094	17	0,0006	
Total	0,5091	23		

Nesse enfoque, são considerados significativos apenas aqueles fatores cujo F₀ é superior ao F_{c(0,95)} = 4,45 para 1 e 17 graus de liberdade. Portanto, os fatores que mais contribuem na obtenção da cota de 7,53 -0,20/+0,10 mm são a temperatura do canhão (B), velocidade de injeção (C), tempo de resfriamento (D) e pressão de recalque (E).

Análise gráfica

a) Gráfico das médias:

Este gráfico foi construído através da utilização da resposta média de cada fator, nos níveis inferior e superior, apresentada anteriormente na tabela 3.

A análise do gráfico das médias, figura 3, a seguir, nos mostra a importância relativa de cada fator na média das medidas da dimensão especificada.

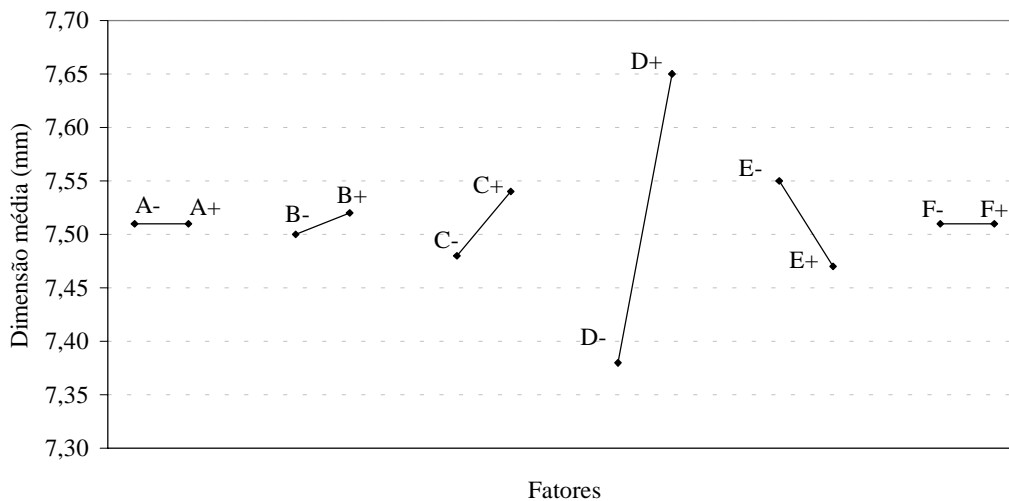


Figura 3: Representação gráfica da variação média das medidas da cota 7,53 -0,20/+0,10 mm.

No gráfico da figura 3, acima, pode ser observado que a temperatura do canhão (B), velocidade de injeção (C), tempo de resfriamento (D) e pressão de recalque (E) são os fatores que, ao passarem do nível inferior para o superior, provocam maior mudança na média das medidas da cota e que os fatores % de material virgem (A) e tempo de recalque (F) não exercem nenhuma influência nesse parâmetro. A influência de cada fator crítico é discutida a seguir:



- Temperatura do canhão (B) – Aumentando a temperatura do canhão, aumenta-se a medida da cota;
- Velocidade de injeção (C) – Aumentando a velocidade de injeção, aumenta-se a medida da cota;
- Tempo de resfriamento (D) – Aumentando o tempo de resfriamento aumenta-se a medida da cota;
- Pressão de recalque (E) – Aumentando a pressão de recalque, diminui-se a medida da cota;

b) *Gráfico de Pareto*

Outra forma de avaliar graficamente a importância de cada fator é através do gráfico de Pareto do valor absoluto dos efeitos. A tabela 5 mostra esse valor para cada fator.

TABELA 5: Valor absoluto dos efeitos de cada fator.

	A	B	C	D	E	F
Efeito	0,00	0,02	0,06	0,27	0,08	0,00

O gráfico de Pareto é mostrado a seguir na figura 4:

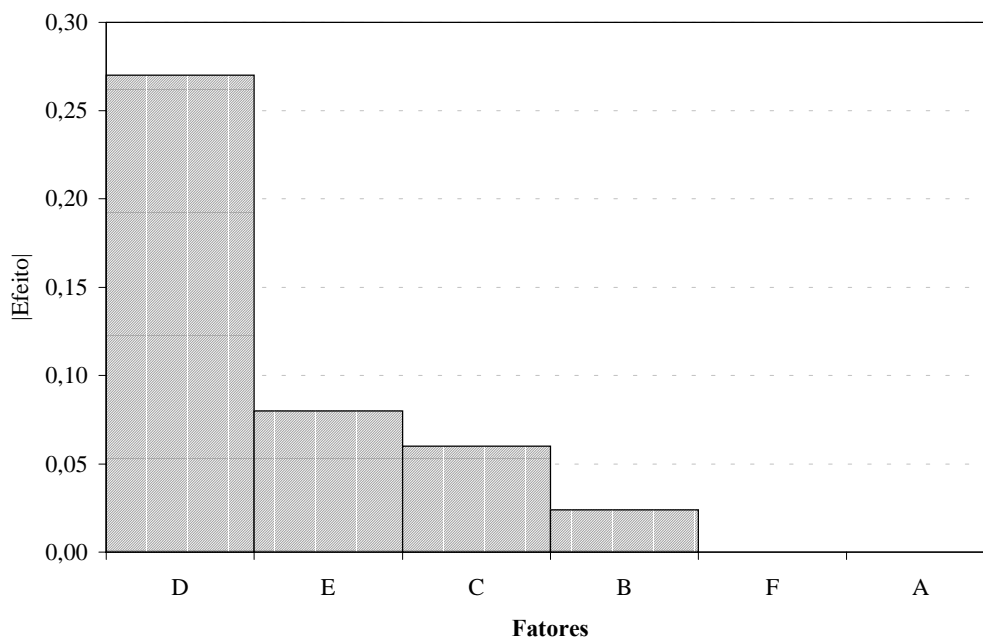


Figura 4: Gráfico de Pareto do valor absoluto do efeito para cada fator na cota 7,53 -0,20/+0,10 mm.

Nesse gráfico pode ser observado que os fatores: % de material virgem (A) e tempo de recalque (F) não exercem nenhuma influência sobre a cota estudada.



Tanto a análise quantitativa quanto a análise gráfica mostraram que os fatores críticos para a dimensão especificada são temperatura do canhão, velocidade de injeção, tempo de resfriamento e pressão de recalque. Assim, o próximo passo foi determinar uma nova condição de processo objetivando enquadrar a cota estudada dentro da faixa de tolerância especificada.

Discussão dos resultados

Uma vez analisados os dados, foi possível, então, conhecer a relação entre as variáveis de injeção e a cota estudada, assim como, identificar os fatores críticos para o processo. Os resultados das análises quantitativa e gráfica serviram como base para o estabelecimento de novas condições de processo buscando a adequação das medidas com a tolerância especificada.

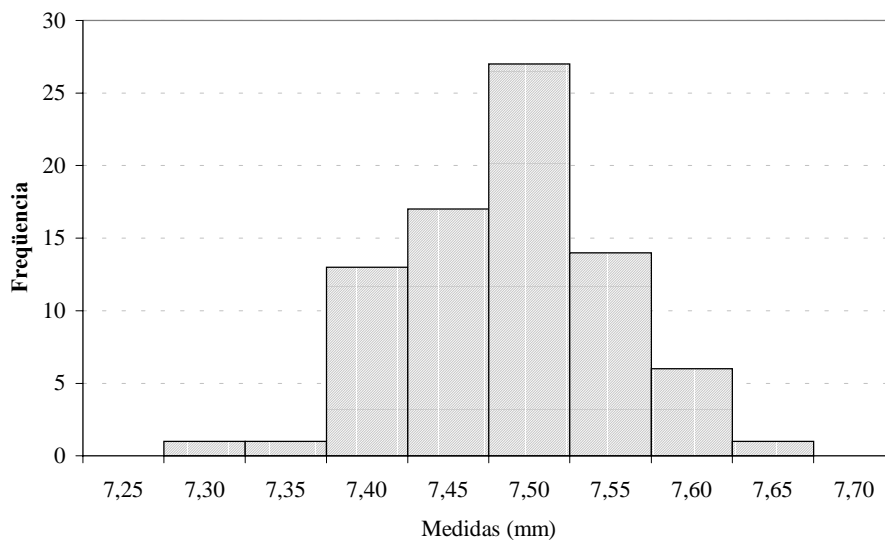


Figura 5: Gráfico de frequência dos valores encontrados para a cota de 7,53 -0,20/+0,10 mm nas novas condições de processo.

Como pode ser observado no gráfico da figura 5 acima, os valores da cota estudada estão concentrados no valor central da tolerância.

Nessas condições de processo pôde-se verificar que, além da redução do número de peças não conformes por estarem fora da tolerância especificada, também houve uma redução no custo do produto de aprox. 27%, devido aos seguintes fatores:

- Redução do custo do material em virtude da utilização de 30% de material reciclado;
- Redução no tempo de ciclo em virtude da redução do tempo de resfriamento e tempo de recalque.

CONCLUSÃO

Conclui-se neste trabalho que, através do Planejamento de Experimentos, as variáveis do processo de injeção que afetam as dimensões de uma peça plástica injetada podem ser de forma rápida e eficiente melhor identificadas e entendidas. Inicialmente, as variáveis: % de material virgem, temperatura do canhão, velocidade de injeção, tempo de resfriamento, pressão de recalque e tempo de recalque do processo de injeção foram selecionadas como sendo as que exercem influência na dimensão estudada. Após a realização dos experimentos, obtenção dos dados experimentais e análise dos resultados, verificou-se que das seis variáveis inicialmente selecionadas, apenas quatro efetivamente influenciavam no dimensional da peça: temperatura do canhão, velocidade de injeção, tempo de resfriamento e pressão de recalque. Devido ao fato de que todas as variáveis tenham sido estudadas ao mesmo tempo, um detalhado conjunto de informações foi obtido e estatisticamente avaliado, permitindo, assim, estabelecer novas condições de processo de modo a garantir que a peça seja moldada dentro das tolerâncias dimensionais especificadas. Uma redução de aproximadamente 27% no custo da peça foi obtida através da redução do custo do material e do tempo de ciclo.



BIBLIOGRAFIA

- 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. *Dissertação de Mestrado. Engenharia de Produção*. Universidade Federal Fluminense, 2001.
- DILLMAN, S.H.; HOWE D.; ROBAR H. Optimization of the injection molding process. *In: SPE ANTEC'96*, p. 754-758, 1996.
- HAWKS, V.; SAUNDERS, D.; STRONG A.B. *et al.* Determination of physical properties in injection molded composites using the design of experiments method. *Sampe Quarterly*. v. 23, n. 4, p. 46-52, 1992.
- MONTGOMERY, D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*, Wiley, 1997.
- SKOURLIS, T. P.; MOHAPATRA, B.; CHASSAPIS, C. *et al.* Evaluation of the effect of processing parameters on the properties of advanced styrenic resins: a design of experiments approach. *Advances in Polymer Technology*. v. 16, n. 2, p. 117-129, 1997.
- VÄÄTÄINEN, O.; JÄRVELÄ, P.; VALTA, K. *et al.* The effect of processing parameters on the quality of injection molded parts by using the Taguchi Parameter Design method. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Application*, v. 21, n.4, p. 211-217, 1994.
- YEUNG, V.W.S.; LAU K.H. Injection molding, "C-MOLD" CAE package, process parameter design and quality function deployment: a case study of intelligent materials processing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, p. 481-487, 1997.
- YOSHII, M.; KURAMOTO, H.; KAWANA, T. *et al.* The observation and origin of micro flow marks in the precision injection molding of polycarbonate. *Polymer Engineering and Science*, v. 36, n. 6, p. 819-826, 1996.