USO DE TÉCNICAS DE EXPERIMENTAÇÃO PARA MELHORIA DA QUALIDADE DE MOLDAGEM PLÁSTICA

Edwin V. C. Galdámez
Universidade de São Paulo - EESC. Av. Trabalhador São Carlense, n. 400. Centro. São Carlos. SP.
edwin@sc.usp.br

Luiz C. R. Carpinetti
Universidade de São Paulo - EESC. Av. Trabalhador São Carlense, n. 400. Centro. São Carlos. SP.
carpinet@prod.eesc.sc.usp.br

Abstract: *This article presents the results of an application of the techniques design and analysis of experiments for the improvement of quality of the result of the molding process, for injection, of plastic products. The application was developed in an industry of the State of São Paulo. For the construction of the arrays of tests, the techniques of fractional factorial experiments had been used. Analysis of variance (ANOVA) was used to identify the factors that intervene significantly with the result of the manufacturing process. The article makes one brief walk through on the involved concepts for, after that, presenting in details the development of the tests and the analysis of the results. Finally, it is argued the best values of regulation of the machine for the improvement of the quality of the process and the resultant product.*

Keywords: *Design of Experiment, Plastic Products and ANOVA.*

1. Introdução

Os conceitos das técnicas de planejamento e análise de experimentos (*DOE-Design of Experiments*) são utilizados pelas empresas que buscam melhorar a qualidade dos produtos ou processos de forma contínua e estão efetivamente comprometidas em assegurar a satisfação do cliente, de maneira pró-ativa [3].

As técnicas são aplicadas nos processos de fabricação ou na fase de desenvolvimento de produtos, com o objetivo de poder determinar e analisar, através de testes, as mudanças que ocorrem nas variáveis de saída ou nas respostas de um sistema, quando mudanças deliberadas são produzidas nas variáveis de entrada do processo [2].

Entre as diversas técnicas de planejamento de experimentos, a técnica de planejamento fatorial fracionário 2^{k-p} tem grande potencial de aplicação em problemas industriais, já que, com essa técnica, consegue-se, com uma pequena quantidade de experimentos, analisar a influência de um número grande de fatores. E, com isso, reduzir o tempo e o custo da experimentação.

Desta forma, este artigo apresenta os resultados de uma série de experimentos realizados utilizando-se a técnica mencionada acima, com o objetivo de melhorar a qualidade de fabricação de um componente plástico, fabricado por moldagem por injeção. O planejamento e a análise dos resultados dos experimentos tem como objetivo principal determinar os fatores de controle do processo que mais influenciam no resultado, ou seja, na qualidade do componente fabricado. O trabalho foi desenvolvido em uma indústria de produtos plásticos localizada no Estado de São Paulo, como parte de um projeto de mestrado.

2. Conceitos das técnicas de planejamento e análise de experimentos

Conforme Montgomery, [2] antes de se iniciar a experimentação, é importante estabelecer o planejamento dos testes. O autor ressalta a importância do domínio do problema por todas as

pessoas envolvidas e recomenda que durante os experimentos, o processo seja cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja feito de acordo com os planos, pois erros no procedimento experimentais muito provavelmente invalidarão os resultados do experimento. Ainda, com a aplicação das técnicas de planejamento de experimentos e análise estatística de dados, procura-se a maior precisão das conclusões tiradas a partir da análise dos resultados, reduzir o número de testes e reduzir os custos da experimentação.

Em experimentos industriais, é comum encontrar a necessidade de estudar o efeito de um ou mais fatores. Com isso, observa-se que o número de testes do experimento tende a crescer à medida que os fatores vão aumentando, tornando-se inviável em termos de custo para as empresas. Por outro lado, existe a necessidade de analisar todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores do experimento para poder realizar as conclusões.

Uma das soluções para este tipo de experimento é aplicar a técnica de planejamento fatorial fracionado 2^{k-p}. Com essa técnica, é possível analisar os efeitos sobre uma resposta de interesse, de k fatores com dois níveis cada um, em 2^{k-p} combinações de teste [2]. Ou seja, com essa técnica, realiza-se apenas parte do experimento (metade, para p =1, ou um quarto, para p = 2), sem comprometer significativamente a precisão das conclusões decorrentes da análise de resultados. Simultaneamente, os custos e o tempo de duração dos testes são significativamente reduzidos.

Na análise dos resultados dos experimentos, busca-se identificar o efeito produzido na resposta quando da variação dos níveis dos fatores de controle do experimento. Os efeitos são classificados como principal, que representa a variação média da resposta resultante da mudança de nível de um fator, mantendo-se os outros fatores fixos, ou de interação, quando a variação da resposta é decorrente da mudança combinada dos níveis de dois ou mais fatores.

Para a análise dos resultados, gráficos lineares podem ser usados para representar e analisar os efeitos principais e os das interações dos fatores. Entretanto, Montgomery, [2] afirma que para se analisar os resultados técnicas estatísticas devem ser usadas. Em especial, a Análise de Variância (ANOVA). Com a análise de variância, é possível avaliar, com confiança estatística, se os efeitos são significativamente diferentes de zero, e com isso concluir quais dos fatores que de fato, quando alterados, interferem na resposta.

Coleman & Montgomery [5] sugerem o roteiro apresentado na Figura 1, para organizar as atividades envolvidas no processo de experimentação.

1. **Empresa:**	**Experimento n.:**	**Visita n.:**	**Data:**
2. **Objetivo do experimento** (melhorar, verificar, medir, identificar, etc):			
3. **Informações relevantes** nas respostas ou nas variáveis de controle: (a) conhecimento teórico ou prático; (b) experimentos realizados anteriomente; (c) quem será o responsável pela coordenação e execução do experimento.			
4. **Listar**: cada fator de controle, fator de ruído, os níveis de ajustagem utilizados no processo, as variáveis de resposta e o processo de controle da qualidade do produto/processo que a empresa utiliza.			
5. Listar os **fatores de controle** mais importantes e os **níveis** que são testados nos experimentos, assim como, selecionar as **variáveis de respostas** e construir a escala númerica que será utilizada pelo experimentador.			
6. Listar as possíveis **interações** entre os fatores de controle e os efeitos principais nas variáveis de resposta.			
7. Listar as **restrições** do experimento: material, disponibilidade do equipamento, número de corridas, etc.			
8. Selecionar a **matriz** que melhor organiza o experimento.			
9. Selecionar as **técnicas de análise** e **representação** dos resultados do experimento.			
10. **Verificar** e **comparar** os resultados do experimento com as condições normais de ajustagem da máquina.			

Figura 1. Roteiro para condução de experimentos.

Baseados nos conceitos descutidos acima, iniciou-se a parte prática do trabalho, que incluiu o planejamento, a condução dos experimentos e análise dos resultados, conforme descritos a seguir.

3. Aplicação das técnicas de planejamento de experimentos no processo de moldagem plástica por injeção

No processo de moldagem plástica por injeção, o material é aquecido e em estado líquido é injetado no molde por um pistão, conforme ilustrado na Figura 2.

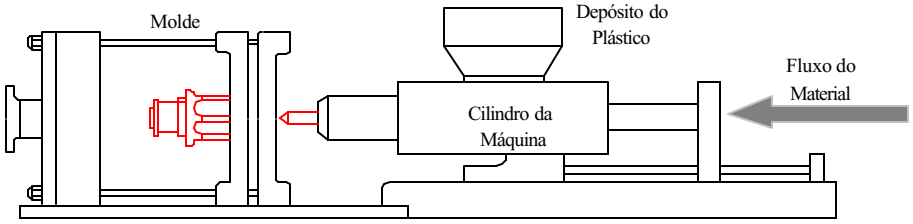

Figura 2. Processo de moldagem plástica por injeção.

Os principais fatores de controle da máquina injetora são [4]:

1. Tempo de ciclo: é o tempo necessário para completar todas as etapas de um ciclo de moldagem de uma máquina injetora.

2. Velocidade de injeção: é a velocidade de avanço do pistão ou da rosca no instante que o material é injetado.

3. Tempo de injeção: é o tempo que à máquina utiliza para realizar a operação de injeção e eventualmente o recalque da peça injetada.

4. Tempo de recalque: é o tempo estabelecido no painel da máquina injetora para que a rosca continue fazendo pressão sobre os componentes injetados.

5. Tempo de resfriamento: fator que controla o tempo que o produto permanece no molde.

6. Temperatura do molde: fator controlado (termômetro) através da temperatura da água que circula pelos moldes.

7. Temperatura da máquina: fator que influência principalmente a temperatura do material que é injetado no molde da máquina.

8. Velocidade de injeção: fator que controla a velocidade do material injetado no molde.

9. Pressão de Injeção: é a pressão com que o material é injetado no molde, controlado eletronicamente pela máquina e através de um manômetro instalado no cilindro da máquina.

10. Pressão de recalque: é a pressão que atua dentro do tempo de recalque.

Neste processo existem vários problemas (defeitos) decorrentes dos fatores de controle de ajustagem da máquina ou mesmo de fatores de ruído. Os defeitos que ocorrem nos componentes são: a rebarba ou falha, deformação da geometria e erros dimensionais, conforme ilustrado na

Figura 3. A Falha é decorrente de pouco material injetado no molde. Isso pode acontecer, quando a pressão é insuficiente, ou o tempo de injeção é pequeno, ou mesmo quando o material não está suficientemente fundido. Por outro lado, quando muito material é injetado no molde, ocorre a rebarba. Os defeitos de Deformação e Dimensional ocorrem, de um modo geral, quando o material é injetado a uma temperatura elevada e o tempo de resfriamento é pequeno. Portanto, percebe-se que os defeitos que ocorrem nos componentes moldados por injeção podem ter mais de uma causa provável.

(a) (b) (c)

Figura 3. Problemas nos produtos. Rebarba (a). Deformação/Dimensional (b). Falha (c).

A engenharia de processo da empresa estudada, constrói uma "ficha técnica" para cada produto fabricado. Nessa ficha são determinados, baseado no conhecimento prático dos funcionários, quais os valores dos parâmetros (temperatura, pressão, velocidade de injeção, tempo de injeção, quantidade de liga da mistura, etc) que os operários devem utilizar na hora de regular a máquina, durante o funcionamento ou na etapa de preparação (*set-up* da máquina). Quando os problemas aparecem, o responsável pelo setor da manufatura muda os valores dos fatores de controle, até se obter resultados com qualidade satisfatória. Porém, ainda que os operadores de máquina e supervisores tenham grande conhecimento e experiência nos processos, eles gastam muito tempo e material para encontrar as regulagens "ideais" das máquinas.

Sendo esse o contexto da empresa em questão, observou-se que existia uma grande oportunidade de aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos, e, assim, poder contribuir para a redução das falhas dos produtos fabricados pela empresa, e também contribuir para a integração universidade-empresa.

No estudo, foram designados funcionários dos setores de processo, inspeção e qualidade, como as pessoas que estariam envolvidas no planejamento dos experimentos, assim como, os autores do trabalho. As reuniões eram realizadas semanalmente, nas quais eram discutidos os conceitos e o processo de organizar e planejar o experimento.

3.1 Seleção dos fatores de controle e os níveis do processo de moldagem plástica por injeção

Na fase inicial foi selecionado o processo de injeção de um dos componentes considerados críticos e, portanto, de bastante interesse para a empresa. Na Tabela 1, são ilustrados os fatores de controle que foram selecionados para realizar o primeiro experimento e os valores que a empresa utiliza para regular a máquina injetora.

FATORES	REGULAGEM DA MÁQUINA	
1. Tempo de injeção	3 seg	
2. Tempo de resfriamento	7 seg	
3. Temperatura do molde	Água Indústrial (gelada) ou Normal	
4. Temperatura da máquina	$Z_{1:bico}$=190°C	Z_3=175°C
	Z_2=180°C	Z_4=170°C
5. Velocidade de injeção	50%	
6. Pressão de injeção	20 BAR	

Tabela 1. Fatores de Controle

A partir de discussões com as pessoas envolvidas, definiu-se que os níveis (faixas de variação - N) de ajustagem desses fatores para a primeira experimentação seriam conforme apresentados na Tabela 2.

N	T. Inj	T. Res	T. Mol	T. Máquina		V. Inj	P. Inj
-1	2 (s)	6 (s)	Água industrial	Z_1: 190°C	Z_3: 165°C	40 %	18 BAR
				Z_2: 170°C	Z_4: 160°C		
+1	10 (s)	15 (s)	Água normal	Z_1: 190°C	Z_3: 230°C	100 %	30 BAR
				Z_2: 240°C	Z_4: 220°C		

Tabela 2. Níveis dos fatores controláveis

3.2 Seleção das variáveis de resposta do experimento

Segundo as pessoas da empresa envolvidas no estudo, as variáveis de resposta que deveriam ser analisadas nesse caso eram: Falha ou Rebarba, Dimensional e Deformação da peça, que foram descritas anteriormente – Figura 3.

No estudo, foram construídas escalas numéricas, com a finalidade de transformar as respostas subjetivas (Aprovado, Tolerável e Reprovado) do experimento em números, que pudessem ser utilizados na análise estatística. Para avaliar a Falha e a Rebarba do componente foi construída uma escala variando entre -10 e 10, sendo que os dois extremos da escala representam muita falha (-10), ou muita rebarba (+10). Quanto mais próximo de zero, menor é o defeito (falha ou rebarba), estando no centro da escala (zero) o componente aprovado pelo sistema de qualidade da empresa. Para, os problemas de deformação e dimensional a escala varia entre 0 e 10, onde, a nota 10, é dada quando o produto apresenta deformação ou erro dimensional excessivos, e zero quando é aprovado. Ainda, nas três escalas existiam valores intermediários (-1,-5 e 1,5) para as peças que tem uma qualidade tolerável.

3.3 Experimentação do processo de moldagem plástica por injeção

Definidas as etapas anteriores, o próximo passo foi construir a matriz da primeira rodada de experimentos. Foram considerados 6 fatores de controle, cada um deles com 2 níveis, resultando 64 combinações. Observou-se, que neste caso era inviável executar o experimento completo. Decidiu-se por executar apenas 1/4 do experimento. A Tabela 3 representa a matriz do experimento, com as combinações dos níveis dos fatores que foram testados.

T	T. Inj (1)	T. Res (2)	T. Mol (3)	T. Máquina (4)		V. Inj (5)	P. Inj (6)
1	2	6	Água Industrial	Z_1:190°C	Z_3:165°C	40	18
				Z_2:170°C	Z_4:160°C		
2	10	6	"	"		100	18
3	2	15	"	"		100	30
4	10	15	"	"		40	30
5	2	6	Água Normal	"		100	30
6	10	6	"	"		40	30
7	2	15	"	"		40	18
8	10	15	"	"		100	18
9	2	6	Água Industrial	Z_1:190°C	Z_3:230°C	40	30
				Z_2:240°C	Z_4:220°C		
10	10	6	"	"		100	30
11	2	15	"	"		100	18
12	10	15	"	"		40	18
13	2	6	Água Normal	"		100	18
14	10	6	"	"		40	18
15	2	15	"	"		40	30
16	10	15	"	"		100	30

Tabela 3. Matriz Fatorial Fracionado 2^{6-2}

Ao realizar a análises estatísticas desse experimento, identificou-se que os efeitos principais significativamente diferentes de zero são produzidos pela Pressão de Injeção e a Temperatura da Máquina. Através dos gráficos lineares e do quadro ANOVA, verificou-se também que a Velocidade de Injeção do material pouco interferia no processo Por outro lado, os efeitos das interações produzidas pela combinação dos fatores 2x3 (Temperatura de Resfriamento x Temperatura do Molde) 1x5 (Tempo de Injeção x Velocidade de Injeção) e 4x6 (Temperatura da Máquina x Pressão), estavam confundidos, tornando difícil determinar qual era a mais importante. Porém, quando os resultados foram discutidos com as pessoas envolvidas da empresa, determinou-se, que a principal interação do processo era produzida pela Pressão de Injeção x Temperatura da Máquina (4x6).

Assim, partiu-se para um segundo experimento, em que se excluiu o fator velocidade de injeção. Com isso, foi possível construir um experimento 2^{5-1}, com 16 rodadas de teste (metade do experimento completo), evitando o confundimento entre efeitos de interação de segunda ordem. A Tabela 4 apresenta os valores dos níveis dos fatores usados nesse segundo experimento, que foram revistos considerando que a faixa de variação de alguns deles estava excessiva. A Tabela 5 apresenta a matriz do experimento, com as combinações dos níveis dos fatores que foram testados.

N	T. Inj	T. Res	T. Mol	T. Máquina		P. Inj
-1	2 (s)	6 (s)	Água gelada	Z_1: 190°C	Z_3: 165°C	18 BAR
				Z_2: 170°C	Z_4: 160°C	
+1	5 (s)	10 (s)	Água normal	Z_1: 190°C	Z_3: 210°C	26 BAR
				Z_2: 220°C	Z_4: 200°C	

Tabela 4. Níveis dos fatores controláveis

T	T. Inj	T. Res	T. Mol	T. Máquina		P. Inj
1	2	6	Água Industrial	Z_1:190°C	Z_3:165°C	26
				Z_2:170°C	Z_4:160°C	
2	5	6	"	"		18
3	2	10	"	"		18
4	5	10	"	"		26
5	2	6	Água Normal	"		18
6	5	6	"	"		26
7	2	10	"	"		26
8	5	10	"	"		18
9	2	6	Água Industrial	Z_1:190°C	Z_3:210°C	18
				Z_2:220°C	Z_4:200°C	
10	5	6	"	"		26
11	2	10	"	"		26
12	5	10	"	"		18
13	2	6	Água Normal	"		26
14	5	6	"	"		18
15	2	10	"	"		18
16	5	10	"	"		26

Tabela 5. Matriz Fatorial Fracionado 2^{k-p}

3.4 Análise dos resultados

Depois de realizar os experimentos, os componentes foram avaliados pelos funcionários da empresa e os resultados são apresentados na Tabela 6. Nesta etapa foram utilizadas novamente as escalas numéricas definidas para a primeira rodada de experimentos.

Teste	Falha-Rebarba (média)	Deformação (média)	Dimensional (média)
1	3,5	0,95	0,45
2	-10	10	10
3	-10	10	10
4	0	5	0
5	-10	10	10
6	0	0,9	0
7	0	0,9	0
8	-10	10	10
9	5,5	0,3	3,55
10	5	0	2,2
11	4,75	0,7	2,9
12	1	3	0,05
13	8	0,65	7,3
14	3,5	0,65	1,15
15	2,25	1,95	1,25
16	5,5	0,55	3,2

Tabela 6. Resultados dos experimentos

FATORES	EFEITO FALHA_REBARBA	EFEITO DEFORMAÇÃO	EFEITO DIMENSIONAL
1:TEMPO_INJ	-1,12	0,58	-1,10
2:TEMPO _RESF	-1,50	1,08	-0,90
3:T_MOLDE	-0,06	-0,54	0,46
4:T_MAQUINA	9,00	-4,99	-2,35
5:PRESSÃO	6,81	-4,53	-3,74
45: T_MAQUINA x PRESSÃO	-4,06	3,53	6,14

Tabela 7. Efeitos principais dos fatores de controle

Na Tabela 7 são apresentados os efeitos principais dos fatores de controle do experimento e o efeito principal produzido pela interação 4x5 (Temperatura da Máquina x Pressão). A Figura 4 descreve, através de gráficos lineares, os efeitos principais produzidos pelos fatores de controle nas variáveis de resposta. A análise dos gráficos mostra que os efeitos significativos são dos fatores temperatura da máquina e a pressão de injeção, sendo que os efeitos dos outros fatores, tempo de resfriamento, temperatura do molde e tempo de injeção, podem ser desprezados. A análise de variância (ANOVA) dos efeitos confirma estas conclusões, conforme apresentado na Tabela 8.

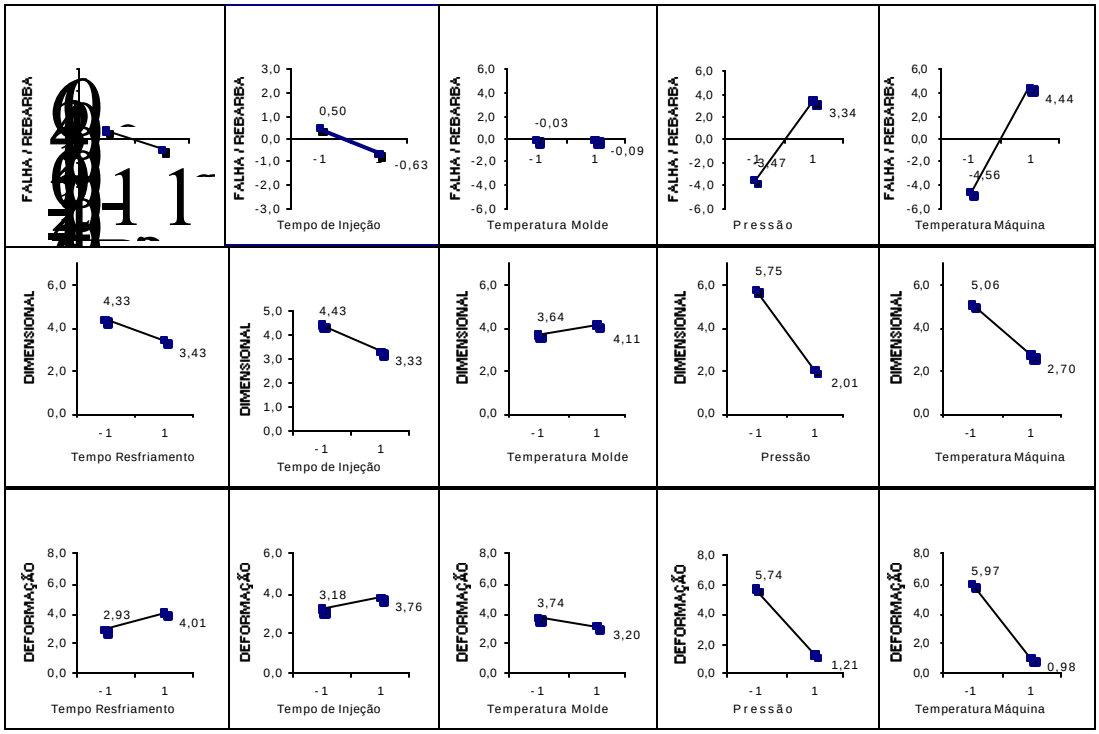

Figura 4. Gráficos lineares

ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA					
FONTES DE VARIAÇÃO	SS	Graus de Liberdade	MS	Estatística F	Nível de significância p
1:TEMP_INJ	5,06	1	5,06	0,64	4,4E-01
2:TEMP_RES	9	1	9	1,14	3,1E-01
3:T_MOLDE	0,01	1	0,01	1,9E-03	9,6E-01
4:T_MAQUIN	324	1	324	41,09	7,7E-05
5:PRESSAO	185,64	1	185,64	23,54	6,7E-04
ERRO	78,84	10	7,88		

Tabela 8. Análise de variância

4. Considerações finais

Os experimentos conduzidos trouxeram resultados bastante significativos. Primeiramente, pode-se mostrar às pessoas responsáveis pela engenharia do processo que, diferentemente do que eles afirmavam, nem todos os fatores de ajustagem do processo inicialmente considerados afetam a qualidade do resultado do processo. Ou seja, para as faixas de ajustagem consideradas, apenas dois fatores, pressão de injeção e temperatura da máquina, apresentaram um efeito significativo sobre as características de qualidade consideradas. Para os outros fatores, pode-se perceber que não existe necessidade de se definir, na ficha técnica do processo, um valor específico de ajustagem da máquina, mas sim uma faixa de valores, dentro da qual o processo terá bom desempenho.

Por outro lado, para os outros dois parâmetros, não foi possível ainda identificar a melhor condição de ajustagem para minimizar os problemas de qualidade do produto. Com esse objetivo, um próximo experimento será realizado utilizando a técnica de análise de superfície de resposta. Para isso, a resposta a ser considerada será uma função definida para as três respostas de interesse (falha/rebarba; dimensional e deformação), de forma que o objetivo seja o de minimizar a função resposta. O experimento será conduzido com dois fatores em dois níveis cada e um ponto central, para se poder avaliar a linearidade da superfície. Com isso, acredita-se ser possível identificar a melhor condição de ajustagem para esses fatores.

Finalmente, ainda um outro resultado bastante importante deste trabalho foi o de mostrar às pessoas envolvidas no estudo a validade do estudo, e com isso não só fomentar o uso dessas técnicas junto à empresa em questão, mas também promover a aproximação universidade-empresa.

5. Agradecimentos

Agradecimentos à Fundação de Aparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo suporte a este projeto e aos diretores e funcionários da empresa estudada, pela colaboração na condução deste projeto.

6. Referências Bibliográficas

1. AQC - Annual Quality Congress. **Foresight XXI**. 2000. http://www.asq.org. (10 jun)
2. Montgomery, D. C. **Diseño y Análisis de Experimentos.** 1991. Grupo Ed. Iberoamérica. Tradução: Jaime Delgado Saldivar, México - DF.
3. Moura, E. C.; Taguchi, S. Aplicação Prática da Engenharia Robusta. 1999. **Controle da Qualidade** . São Paulo, n.81, p.82-86. fev.
4. Apostila ASTRA, **Influência das Variáveis do Ciclo no Produto Final**. 1999. São Paulo.
5. Coleman, D. E. e Montgomery, D. C. A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. 1993. **Technometrics** . v.35, n.1, p.1-12.