

# DOE APLICADO AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO SAE 305<sup>1</sup>

Guilherme O. Verran<sup>2</sup>  
Rui Patrick K. Mendes<sup>3</sup>  
Luiz V.O. Dalla Valentina<sup>4</sup>

## Resumo

Foi realizado um estudo envolvendo a utilização de uma metodologia experimental DOE (design of experiments) para investigar a influência dos parâmetros de injeção velocidade na primeira fase, velocidade na segunda fase e pressão de recalque sobre a qualidade de peças injetadas usando a liga SAE 305. Inicialmente apresenta-se uma fundamentação teórica sobre métodos experimentais. A seguir foi elaborado um plano de corridas experimentais onde foram utilizadas diversas combinações entre os três parâmetros de injeção acima mencionados de forma a possibilitar a avaliação de suas influências quanto à ocorrência de defeitos de fundição conhecidos como porosidades. Para avaliação da sanidade das peças obtidas foram realizadas inspeções visuais, análises fotográficas e determinação das porosidades usando analisador de imagens, bem como medições de densidade em uma região significativa de uma peça que apresentava uma grande incidência de porosidades após a sua usinagem. Os resultados das densidades das amostras foram analisados por meio do emprego da análise de variância para três fatores com dois ou três diferentes níveis. Os valores obtidos permitiram avaliar as influências de variações nos três diferentes parâmetros de injeção estudados sobre a sanidade das peças obtidas e a combinação de parâmetros que permitiram a obtenção dos melhores e dos piores resultados quanto à presença de porosidades.

**Palavras-chave:** Ligas de alumínio; Fundição sob pressão; Defeitos; Métodos experimentais.

## DOE APPLIED TO THE DIE CASTING PROCESS OF SAE 305 ALUMINUM ALLOY

### Abstract

This paper describes the results obtained in a research project in which a DOE experimental methodology was used to analyse the influences of three injection parameters (velocity in the first and second stages, and up set pressure) on the internal quality of the obtained parts die casting using the SAE 305 alloy. It initially is introduced a bibliographical revision about experimental methods. Following an experimental plane was elaborated by use of different combinations of the injection parameters in investigation, in order to determine the influence regarding to occurrence of porosities in the die casting parts. The quality assessment of the die casting parts was based on density measurements, evaluation of the porosity index, visual inspection and via qualitative image analysis. The results make possible to evaluate the influences of variations on the integrity of the components of the three different injection parameters studied, and the combination of parameters, which yields the best and worst results concerning the existence of porosities.

**Key words:** Aluminium alloys; Die casting; Defects; Design of experiments.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Dr. Eng. Met. – Prof. do DEM-PGCEM/UEDESC

<sup>3</sup> Msc. Eng. Mat. – Prof. da UNERJ

<sup>4</sup> Dr. Eng. Prod. - – Prof. do DEM-PGCEM/UEDESC

## 1 INTRODUÇÃO

Nos processos de fabricação industriais, existem vários parâmetros com diferentes níveis de ajustes, que podem influenciar as características finais do produto. Para se obter informações sobre os processos de fabricação, normalmente se utilizam procedimentos práticos, com o objetivo de determinar os parâmetros necessários para a obtenção de um produto com qualidade.<sup>(1,2)</sup>

Estes experimentos são empregados para resolver problemas de fabricação, decidir entre diferentes processos de manufatura, diferentes conceitos de produto, entender a influência de determinados fatores, entre outros.

Este procedimento torna-se cada vez mais importante na medida que se intensifica a base tecnológica dos produtos e as exigências governamentais e dos clientes aumentando a necessidade do emprego de experimentos durante todas as etapas do ciclo de vida do produto.

Uma das técnicas utilizadas para o planejamento dos experimentos é chamada em inglês de *Design of Experiments* (DOE). Esta técnica visa definir quais os parâmetros, quantidades, níveis e combinações, necessários para um processo de fabricação, de modo a obter resultados estatisticamente confiáveis, utilizando os recursos disponíveis no chão de fábrica o mais racionalmente possível, visando economizar tempo e reduzir custos. Porém, as ferramentas experimentais não substituem o conhecimento técnico dos especialistas das empresas sobre os processos. Trata-se de um roteiro sistemático a ser seguido, que possibilita solucionar problemas de processos industriais com maior objetividade, utilizando técnicas experimentais e estatísticas.<sup>(1-4)</sup>

Neste trabalho a metodologia DOE foi utilizada na determinação da influência de alguns parâmetros da máquina de injeção sobre a qualidade de peças fundidas sob pressão utilizando a liga de alumínio SAE 305. Publicação recente<sup>(5)</sup> apresenta de forma mais detalhada os resultados obtidos nesta pesquisa.

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO DOE APLICADOS AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

No intuito de facilitar o entendimento são apresentados alguns dos conceitos fundamentais.<sup>(2,6)</sup>

**Variáveis de resposta:** são as variáveis dependentes que sofrem alterações quando submetidas a diferentes parâmetros de processo, nos experimentos podem existir uma ou mais variáveis de processo, no caso, índice de porosidade, percentual de porosidade e densidade da peça.

**Fatores de controle:** São as variáveis independentes (X1,X2,X3..) selecionadas no experimento que variadas em diferentes níveis de intensidade produzem efeitos diferentes nas variáveis de resposta ou dependentes, podem segundo Juran<sup>(7)</sup> ser subdivididos em:

- fatores de controle quantitativo (Pressão de injeção, velocidade do pistão, temperatura, etc).
- fatores de controle qualitativos (máquina utilizada, operador, tipo de liga alumínio, etc.).

**Fatores de ruído:** São as variáveis que influenciam nas variáveis de resposta que podem ou não ser conhecidas, devendo ser tomados cuidados especiais para que os fatores de ruído não interfiram nos resultados experimentais.

**Níveis dos fatores:** São as intensidades com que os fatores de controle são variados num determinado experimento. Podem ser identificados por nível baixo (1) nível médio (2) e nível alto (3).

**Tratamentos:** cada corrida de injeção é um tratamento, que é a combinação dos níveis dos fatores de controle (parâmetros de injeção).

**Matriz de experimentos:** é a matriz composta com os fatores de controle com os diferentes níveis para cada tratamento utilizado.

**Repetição:** é a reprodução da combinação selecionada sob as mesmas condições experimentais. Segundo Montgomery, este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental, utilizado para observar se as diferenças entre as variáveis de controle são significativas ou não.<sup>(2)</sup>

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL APLICADA AO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

#### 3.1 Escolha dos Parâmetros de Influência e Níveis

O processo de fundição sob pressão é regido por uma série de parâmetros, que adequadamente determinados e ajustados, resultam em uma peça injetada de qualidade. Normalmente, as principais variáveis controladas são a temperatura do molde, volume de dosagem, velocidades lentas e rápidas de injeção, pontos de comutação, pressões de injeção, recalque bem como a composição química e a temperatura do alumínio líquido.

Tagushi afirma que os fatores que regem o processo de fundição sob pressão podem ser ajustados em diferentes níveis de intensidade, existindo algumas combinações dos mesmos que podem resultar na robustez do processo de fabricação.<sup>(8)</sup>

O diagrama de causa e efeito foi utilizado para levantar todos os parâmetros do processo de fundição sob pressão de alumínio, que podem influenciar na qualidade da peça injetada, ver Figura 1. Esse procedimento foi empregado para discutir os parâmetros durante a atividade de “brainstorming” realizada com os técnicos envolvidos no processo de fabricação na empresa.

De acordo com o estudo realizado por G.P. Syrcos, aos parâmetros de injeção podem ser subdivididos em quatro categorias:<sup>(9)</sup>

- Parâmetros relacionados com a injetora;
- Parâmetros relacionados com a câmara de injeção;
- Parâmetros relacionados com a matriz de injeção;
- Parâmetros relacionados com o metal líquido.

No presente estudo optou-se por os parâmetros da injetora: velocidade da primeira e segunda fase e pressão de recalque, por serem os que podem ser mais facilmente controlados e que na prática apresentam a maior influência sobre o processo de injeção.

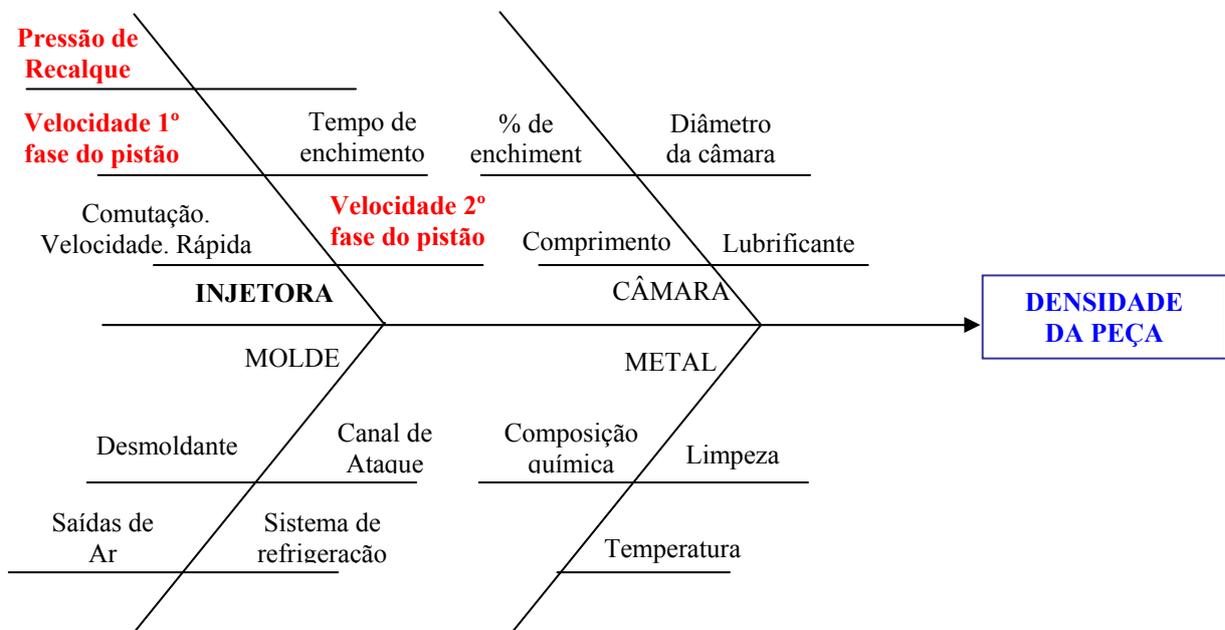
Os três parâmetros de injeção ficaram com as seguintes configurações de níveis:

- Dois níveis de velocidade de 2ª fase (rápida) ajustadas em 1,3 e 2,6 m/s;
- Três níveis de velocidade de 1ª fase (lenta) 0, 14, 0,27 e 0,29 m/s;
- Três níveis de pressão de recalque: 15,0 Mpa, 22,5 Mpa e 30,0 Mpa.

### 3.2 Seleção dos Fatores de Controle e das Variáveis de Resposta

Para avaliação da sanidade foi escolhida a região crítica da peça quanto à ocorrência de porosidade (Figura 2), ou seja, as regiões das faces que são usinadas. A principal causa de refugo está localizada em uma das faces usinadas, logo para facilitar a avaliação das mesmas e permitir uma maior precisão das análises, decidiu-se cortar as faces para analisá-las separadamente.

Para determinação da qualidade das peças injetadas, foram utilizados três critérios distintos. O primeiro, pela inspeção visual da quantidade de bolhas, onde foram estabelecidos 5 níveis de porosidade, desde o nível 0 que representa isenção de porosidade, até um nível alto de porosidades visível macroscopicamente representado pelo nível 4. O segundo critério utilizado foi a determinação da densidade, pelo princípio de Arquimedes, da região da peça com porosidade (face usinada). O terceiro critério utilizado foi determinação do percentual quantitativo de porosidade superficial das amostras com auxílio de um software computacional.



**Figura 1.** Diagrama de causa e efeito para o problema em estudo, indicando os parâmetros testados (em vermelho e negrito).



**Figura 2.** Peça utilizada neste estudo - Tampa Duplo Cilindro – (a), e detalhe da superfície que sofre usinagem mostrando a ocorrência de porosidade (b).

### 3.3 Determinação da Matriz Experimental

Adotando o arranjo fatorial foi elaborada uma tabela com todas as combinações possíveis dos fatores considerando os níveis utilizados, como pode ser observado na Tabela 1, onde os diferentes níveis são apresentados sob a forma dos valores reais de cada parâmetro utilizado.

**Tabela 1.** Valores dos fatores de controle para cada combinação

Corrida	Velocidade da 1º fase (m/s)	Velocidade da 2º fase (m/s)	Pressão de recalque (Mpa)
1	0,14	1,25	13,8
2	0,14	2,53	14,0
3	0,14	1,32	23,4
4	0,14	2,75	24,3
5	0,14	1,23	33,7
6	0,14	2,75	33,6
7	0,27	1,34	13,3
8	0,27	2,62	13,5
9	0,27	1,35	22,6
10	0,27	2,47	23,5
11	0,27	1,33	30,7
12	0,27	2,53	30,2
13	0,29	1,34	13,3
14	0,29	2,56	13,5
15	0,29	1,37	25,7
16	0,29	2,65	26,4
17	0,29	1,35	33,3
18	0,29	2,64	33,3

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Avaliação dos Fatores de Controle

Fazendo a média dos níveis dos fatores de controle utilizados, juntamente com o desvio padrão, chegou-se aos resultados da Tabela 2. Estas médias foram utilizadas como referência para os estudos.

Os valores da velocidade da primeira fase sofreram pouca variação durante ao experimento, já os valores da velocidade da 2ª fase sofreram uma dispersão de até 9,6% para o nível de maior intensidade e a pressão de recalque uma dispersão de 6,2% para o nível intermediário de ajuste (24,3 Mpa).

**Tabela 2.** Valores médios para os parâmetros estudados

Velocidade na 1ª Fase		
Nível	Média (m/s)	Desvio Padrão (%)
1	0,14	0,5
2	0,27	0,4
3	0,29	0,6

Velocidade na 2ª Fase		
Nível)	Média (m/s)	Desvio Padrão (%)
1	1,32	5,3
2	2,61	9,6

Pressão de Recalque		
Nível	Média (Mpa)	Desvio Padrão (%)
1	13,6	2,2
2	24,3	6,2
3	32,5	4,6

Os valores da velocidade da primeira fase sofreram pouca variação durante os experimentos, já os valores da velocidade da 2ª fase sofreram uma dispersão de até 9,6% para o nível de maior intensidade e a pressão de recalque uma dispersão de 6,2% para o nível intermediário de ajuste (24,3 Mpa).

### 4.2 Avaliação das Variáveis de Resposta

Utilizando o método de Arquimedes, foram então determinadas as densidades da região da peça em estudo para cada amostra injetada, totalizando assim cinco medições de densidade para cada condição experimental testada. A Tabela 3 apresenta os resultados de densidade obtidos.

Tanto para o critério de avaliação por densidade, como para a porosidade superficial, pode-se observar uma grande desvio padrão para a combinação de fatores de controle N° 14, o que indica que o processo de injeção ajustado com esta combinação de parâmetros não apresenta estabilidade. Ao contrário da combinação N° 5 que apresentou baixo desvio padrão, ou seja, maior estabilidade do processo.

Os resultados do critério de avaliação usando o índice quantitativo de porosidades (% em área) também foram registrados e são apresentados com detalhe em outras publicações.<sup>(10,11)</sup>

Os resultados das densidades das amostras foram analisados por meio do emprego da análise de variância para três fatores com os níveis conforme mencionado anteriormente, a Tabela 4 apresenta os resultados desta análise.

Por meio dos resultados da Tabela 4 foi possível concluir, com 95% de confiança, que a velocidade da segunda fase e pressão de recalque, e também a interação entre estes dois fatores afetam a ocorrência de porosidade na superfície usinada da peça.

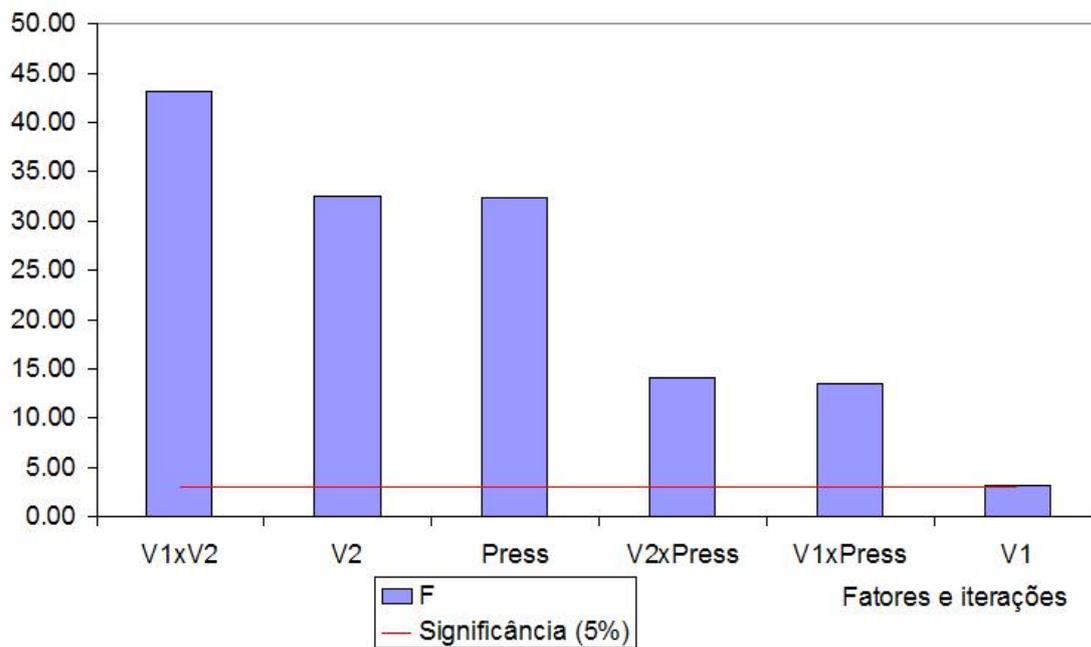
**Tabela 3.** Resultados de densidade para as diferentes condições experimentais utilizadas.

Nº	Fatores de controle			Variável de resposta densidade (g/m <sup>3</sup> )						
	V1	V2	Press	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Média	Desvio Padrão
1	1	1	1	2.689	2.656	2.667	2.685	2.692	2.678	0.016
2	1	2	1	2.666	2.666	2.656	2.667	2.654	2.662	0.007
3	1	1	2	2.694	2.702	2.701	2.697	2.701	2.699	0.004
4	1	2	2	2.693	2.693	2.695	2.675	2.695	2.690	0.009
5	1	1	3	<b>2.709</b>	<b>2.702</b>	<b>2.707</b>	<b>2.709</b>	<b>2.706</b>	<b>2.707</b>	<b>0.003</b>
6	1	2	3	2.699	2.702	2.703	2.704	2.703	2.702	0.002
7	2	1	1	2.680	2.681	2.690	2.664	2.651	2.673	0.016
8	2	2	1	2.669	2.664	2.644	2.685	2.635	2.660	0.020
9	2	1	2	2.697	2.701	2.701	2.705	2.699	2.701	0.003
10	2	2	2	2.689	2.689	2.691	2.698	2.687	2.691	0.004
11	2	1	3	2.703	2.701	2.703	2.701	2.706	2.703	0.002
12	2	2	3	2.700	2.684	2.694	2.675	2.693	2.689	0.010
13	3	1	1	2.685	2.695	2.674	2.694	2.691	2.688	0.009
14	3	2	1	<b>2.576</b>	<b>2.679</b>	<b>2.685</b>	<b>2.662</b>	<b>2.593</b>	<b>2.639</b>	<b>0.051</b>
15	3	1	2	2.703	2.699	2.706	2.697	2.707	2.702	0.004
16	3	2	2	2.693	2.680	2.689	2.679	2.678	2.684	0.007
17	3	1	3	2.692	2.699	2.705	2.699	2.705	2.700	0.005
18	3	2	3	2.690	2.617	2.683	2.691	2.645	2.665	0.033

**Tabela 4.** Análise de variância da densidade para três fatores.

Variável	Grau de Liberdade (GL)	Soma dos quadrados (SQ)	Variância (QM)	F <sub>0</sub>	F <sub>5%</sub>
V1	2	0.002	0.001	3.17	3.12
V2	1	0.008	0.008	32.54	3.96
Press	2	0.016	0.008	32.33	3.12
V1x V2	2	0.021	0.010	43.20	3.12
V1x Press	4	0.013	0.003	13.57	2.5
V2x Press	2	0.007	0.003	14.03	3.12
Tratamento	13	0.030	0.002	9.64	-
Resíduo	83	0.020	0.000	-	-
Total	109	0.050	-	-	-

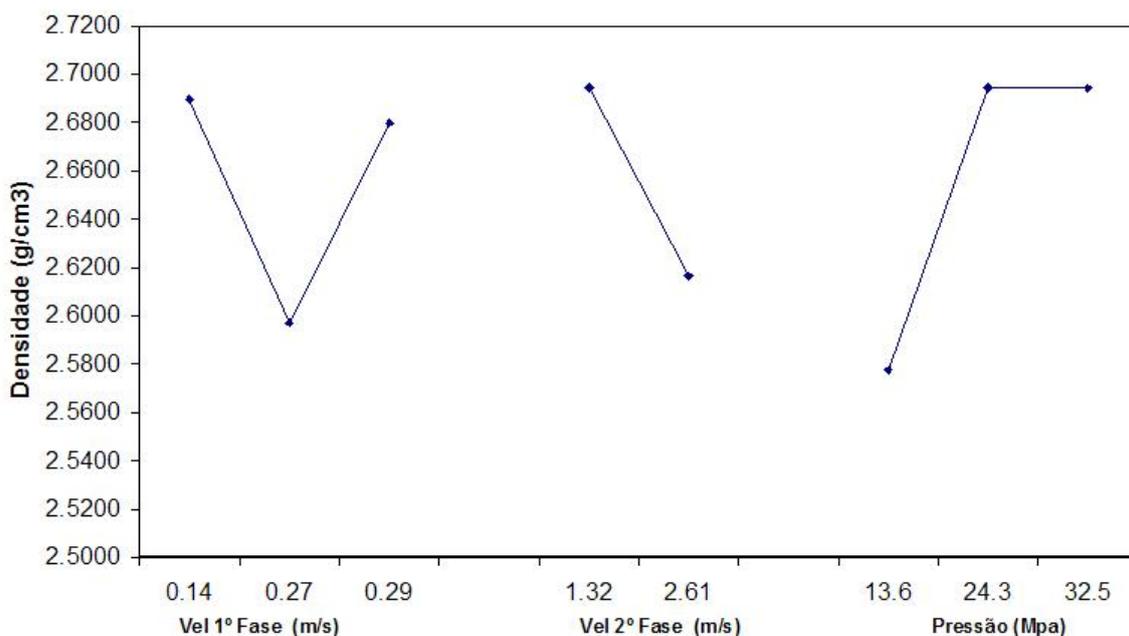
A Figura 3 apresenta o gráfico dos valores de F<sub>0</sub> para cada fator e respectivas iterações.



**Figura 3.** Gráfico dos valores de F para cada fator e respectivas iterações

Os valores de pressão de recalque e velocidade da 2ª fase (V2) analisados são significantes ao nível de 5%, a iteração entre as velocidades da 1ª e 2ª fase se mostrou bastante significativa, exceto para o fator de velocidade da 1ª fase (V1).

Para auxiliar a interpretação do modo como os fatores exercem seus efeitos sobre os valores de densidade, foi construído também o gráfico da Figura 4, mostrando as respostas médias obtidas para cada tratamento.



**Figura 4.** Representação gráfica das variações na densidade (valores médios) para cada parâmetro testado.

Na Figura 4, que apresenta o gráfico de respostas médias, observa-se que a primeira fase de injeção não apresenta uma tendência de correlação com a densidade das peças, porém para os valores da velocidade da segunda fase e pressão de recalque, os valores mostraram uma tendência. A velocidade da segunda fase mostrou uma correlação negativa, ou seja, quanto maior a velocidade, menor a densidade. A pressão de recalque apresentou uma correlação positiva, porém como pode ser observado no gráfico da Figura 4, a partir de 24,3 MPA não apresentou a mesma tendência de redução da densidade com o aumento da pressão de recalque.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho levaram as seguintes conclusões:

- os melhores valores em termos de sanidade interna da peça em estudo foram obtidos com a utilização de baixas velocidades de injeção, tanto na primeira fase (0,14m/s), como na segunda fase (1,33 m/s) e elevadas pressões de recalque (30,0Mpa),
- os valores de densidade, e conseqüentemente a sanidade interna apresentaram relação direta com as pressões de recalque utilizadas, não tendo sido constatadas melhoras significativas quando se aumentou a pressão de recalque de 24,3 Mpa para 32,5 Mpa. No entanto os melhores valores em termos de combinação dos três parâmetros de injeção testados foram obtidos com o uso de pressão de recalque igual a 32,5 Mpa.
- em geral os resultados obtidos concordam com os dados da revisão bibliográfica, que para atingir baixos índices de porosidade, se torna necessário trabalhar com baixas velocidades de 1ª e 2ª fase e altas pressões de recalque.
- a utilização da metodologia experimental (DOE) se mostrou efetiva na análise deste problema, e contribui para o conhecimento mais aprofundado da influência dos parâmetros de injeção sobre a qualidade das peças injetadas com o alumínio SAE 305.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a WEG Motores pela disponibilização de suas instalações e do seu pessoal técnico para a realização dos experimentos.

## REFERÊNCIAS

- 1 COLEMAN, D.E.; MONTGOMERY, D.C. A systematic approach to planning for designed industrial experiment. **Techno metrics**, v35, n.1, p. 1 – 12, Feb. 1993.
  - 2 MONTGOMERY, D.C. Diseño y análisis de experimentos. Trad. Por Jaime Delgado Salvador. **México, Ibero América**. 1991
  - 3 ANTONY, J.; KATE, M.; FRANGOU, A. A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques. **The TQM Magazine**, v. 10, n.3, p. 169-176. 1998.
  - 4 STEINBERG, M.D.; HUNTER, W.G. Experimental design: review and comment. **Techno metrics**, v.26, n.2, p.71 – 130, may, 1984.
- MENDES, R.P.K. **Avaliação da Influência dos Parâmetros de Injeção Sobre a Qualidade de Peças Injetadas em Ligas de Alumínio** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – UDESC, Joinville, 2005.

- 7 WERKENMA, M. & AGUIAR, S. Planejamento e Análise de Experimentos: Como Identificar e Avaliar as Principais Variáveis Influentes em um Processo. **TCQ série Ferramentas da Qualidade**, 1<sup>a</sup> ed., Belo Horizonte, Azul Computação Gráfica Ltda, 156-164, 1996.
- 8 JURAN, J.M.; GRZYNA JR., F.M.; BINGHAM JR., R.S. **Quality control hand book**. 3. ed. New York, McGraw-Hill. Cap.27, p. 1 – 49. 1951.
- 9 TAGUSHI, G.. Tagushi on robust technology development: **bringing quality upstream by Genichi Tagushi**. New York, ASME. 1993.
- 10 SYRCOS G. P. Die casting process optimization using Tagushi methods. **Journal of Materials Processing Technology**, v.135, p. 68–74, 2003.
- 11 VERRAN, G.O., MENDES, R. P. K., ROSSI, M.A. Avaliação da Influência dos Parâmetros de Injeção Sobre a Formação de Defeitos em Peças Injetadas em Ligas de Alumínio: Resultados Experimentais Vs. Simulação Numérica. Anais do III COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville, abril 2005.
- 12 VERRAN, G. O., MENDES, R. P. K., ROSSI, M. A.. Influência dos Parâmetros de Injeção na Qualidade de Peças Injetadas em Ligas de Alumínio. Anais do SULMAT 2004 - II Congresso em Ciência dos Materiais do Mercosul, Joinville, setembro 2004.