

## APLICAÇÃO DE PROJETO DE EXPERIMENTOS PARA MELHORIAS NOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE INJEÇÃO DE DUAS PEÇAS PRODUZIDAS

### APPLICATION OF DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE) FOR IMPROVEMENTS IN THE PARAMETERS OF PLASTIC INJECTION PROCESS FOR TWO PARTS PRODUCED IN ABS PLASTIC

Ana Maria Nunes dos Santos\* E-mail: [a.ana.mariasantos@gmail.com](mailto:a.ana.mariasantos@gmail.com)

Ariane Ferreira Porto Rosa\* E-mail: [afprosa61@gmail.com](mailto:afprosa61@gmail.com)

Rogério Royer\* E-mail: [rogroyer@ufrgs.br](mailto:rogroyer@ufrgs.br)

Gilson Simões Porciúncula\* E-mail: [gilson.porciuncula@gmail.com](mailto:gilson.porciuncula@gmail.com)

\*Universidade Federal de Pelotas (UFPeL), Pelotas RS

**Resumo:** Com um grande número de concorrentes no mercado atual, as empresas precisam buscar por inovações que mantenham a qualidade do seu produto e diminuam o seu custo de produção. O avanço nos processos produtivos aumentou a utilização de materiais plásticos como matéria-prima, que apresentam um preço mais baixo do que materiais metálicos e ainda são resistentes a corrosão. A moldagem por injeção é um método muito utilizado na transformação de plásticos. Por apresentar muitas variáveis, esse tipo de produção precisa ser muito controlada para que as peças finais apresentem a qualidade desejada. Este artigo apresenta um estudo de caso realizado para melhorias nos parâmetros de um processo de injeção de duas peças produzidas em plástico ABS em uma empresa fabricante de produtos médico hospitalares situada na cidade de Pelotas no RS. Na realização do estudo de caso foi elaborado um projeto de experimentos com quatro variáveis do processo de injeção e duas cotas críticas para a montagem do produto final de cada uma das peças.

**Palavras-chave:** Processo de Injeção. Plástico ABS. Projeto de Experimentos.

**Abstract:** With a large number of competitors in the current market, companies need to search for innovations that maintain the quality of their product and decrease their cost of production. The improvement in production processes has increased the use of plastic materials as raw materials, which are priced lower than metals and are still resistant to corrosion. Injection molding is a method widely used in plastics processing. Because it presents many variables, this process needs to be very controlled so that the final pieces present the desired quality. This paper presents a case study carried out for improvements in the parameters of a two - piece injection process produced in ABS plastic at a company that manufactures hospital medical products located in the city of Pelotas, RS. In the accomplishment of the case study an experiment project was elaborated with four variables of the injection process and two critical dimensions for the assembly of the final product of each one of the pieces.

**Keywords:** Injection Process. ABS Plastic. Design of Experiments.

## 1 INTRODUÇÃO

A alta competitividade no mercado exige que as indústrias busquem cada vez mais por soluções inovadoras, que nem sempre são simples ou economicamente viáveis de serem aplicadas. Com o avanço dos processos de produção, os polímeros

aparecem como uma resposta. Em comparação com materiais metálicos, os polímeros apresentam baixo custo de matéria-prima, resistência a ambientes corrosivos, facilidade em produzir peças com geometrias complexas e ainda absorvem vibrações.

Os materiais plásticos podem ser moldados por diversos tipos de processos de transformação, mas Bianchezzi (2014) afirma que a moldagem por injeção é utilizada em mais de 33% de todos os polímeros processados. Esse tipo de moldagem pode ser descrita como um processo cíclico onde um molde com refrigeração é preenchido com material fundido, seguido pela resfriamento e retirada da peça pronta (GOODSHIP, 2004).

Apesar de parecer simples, as propriedades das peças injetadas dependem de vários parâmetros. Esses parâmetros, por sua vez, apresentam um intervalo de valores ideais, ou seja, que garantem uma qualidade maior nas peças injetadas (BIANCHEZZI, 2014). Porém, se esses valores não estiverem controlados, a probabilidade de ocorrerem peças defeituosas é grande. Por esse motivo, quando se deseja caracterizar esse tipo de processo, é recomendado a realização de um projeto de experimentos.

O planejamento de experimentos é um método estatístico, onde são realizados vários testes que combinam diferentes valores de parâmetros de máquina, com o objetivo de verificar as mudanças de alguma variável de saída do processo. Por esse motivo, esse método é utilizado para delinear os processos produtivos e, de acordo com Cadore *et al.* (2015), aperfeiçoa a produção, eleva a qualidade e reduz as perdas presentes no processo.

Projetos de Experimentos tem sido utilizado para otimização de processos industriais. Mello *et al.* (2010) aplicaram projetos de experimentos para melhoria da qualidade superficial e dimensional de protótipos rápidos produzidos por modelagem por deposição de material fundido. Viana e Faria Neto (2013) aplicaram planejamento de experimentos robusto de Taguchi para melhoria para minimizar a porosidade nas peças produzidas em um processo de fundição sob pressão de alumínio. Melo *et al.* (2013) aplicaram projetos de experimentos para otimizar os parâmetros de usinagem do ferro fundido no processo de fresamento de uma planta industrial.

O estudo realizado por Galdámez e Carpinetti (2001) aplicou o planejamento e análise de experimentos na fabricação de produtos plásticos por injeção. O objetivo

principal era identificar quais parâmetros causam mais problemas na qualidade do produto final e encontrar a condição ótima de processamento para minimizar esses problemas.

Um estudo de caso mais específico foi realizado por Fernandes *et al.* (2011). Neste estudo o projeto de experimentos foi utilizado para investigar a influência da velocidade de injeção e do tempo de recalque em peças injetadas em polipropileno. Como variáveis resposta foram utilizados o peso e o diâmetro da peça em estudo.

Já no trabalho de Cadore *et al.* (2015), os experimentos foram utilizados para auxiliar no desenvolvimento de um processo produtivo de injeção de dispositivos médicos. O objetivo da aplicação do projeto de experimentos foi a melhoria no controle de qualidade dos produtos produzidos, já que, por ser um produto médico, sua aplicação é de extrema importância para o usuário final.

Bianchezzi (2014) também aplicou projetos de experimento em um processo de injeção. O objetivo de seu trabalho foi identificar a influência dos parâmetros de injeção em uma variável resposta específica, a tensão residual presente na peça após injetada.

Este artigo apresenta um estudo de caso com uma aplicação de projeto de experimentos tendo como objetivo principal definir melhorias nos parâmetros do processo de injeção de duas peças produzidas em plástico ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene polymer*), utilizadas na montagem de dispositivos médicos. Por se tratar de um processo muito específico, os mesmos métodos aplicados a outros polímeros ou moldes podem apresentar resultados diferentes.

O artigo está estruturado de forma que a seção 2 apresenta uma revisão teórica sobre o Processo de Injeção com Plásticos e Projeto de Experimentos Fatoriais. Na seção 3 são apresentados os procedimentos metodológicos com a caracterização da pesquisa. Na seção 4 o estudo de caso é apresentado com uma breve descrição da empresa, a escolha dos fatores e variáveis resposta do estudo, o planejamento do projeto de experimentos. A seção 5 apresenta os resultados e discussões a partir do projeto de experimentos realizado. Finalmente, na seção 6 o trabalho é concluído e são apresentadas perspectivas de trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Processo de Injeção em Plásticos

O processo de injeção em plásticos é muito utilizado por apresentar diversas vantagens. Com tempos de ciclo curtos e moldes com várias cavidades, a produção de peças em massa e com tolerâncias pequenas se torna muito econômica (GOODSHIP, 2004). Outra vantagem é que, se o processo está estável, em controle estatístico, a qualidade das peças não apresenta grande variação entre ciclos ou mesmo entre cavidades.

Dentro desse processo, existem diversas variáveis de controle, que podem ser divididas em variáveis de controle do processo, da máquina injetora e da qualidade. O Quadro 1 apresenta a descrição de cada uma e alguns exemplos.

**Quadro 1** – Variáveis de Controle do Processo de Injeção

Variáveis	Descrição	Exemplos
Controle do Processo	Cavalheiro (2007) define que essas variáveis são aquelas que alteram as propriedades internas da matéria-prima, como por exemplo o nível de tensão residual, orientação molecular e estrutura química.	Temperatura da massa; Pressão na cavidade; Taxa de resfriamento; Velocidade de escoamento.
Controle da Máquina Injetora	Parâmetros operacionais para manter o controle do processo de injeção e a qualidade das peças produzidas (BIANCHEZZI, 2014).	Velocidade de avanço do parafuso; Pressão de injeção/recalque; Temperatura do cilindro de aquecimento; Velocidade de rotação do parafuso; Temperatura e vazão do fluido de resfriamento do molde.
Controle da Qualidade	Variáveis fornecidas pela máquina injetora como respostas do processo que garantem a repetibilidade do processo.	Tempo de dosagem, Volume do colchão; Tempo de preenchimento.

Fonte: Autores (2017)

No processo de injeção de plásticos é necessário manter as variáveis de controle da máquina injetora trabalhando com valores de acordo com o material e o molde utilizado para que seja possível manter a produção padronizada (variáveis da qualidade) e com produtos dentro do esperado pelo cliente (variáveis do processo).

## 2.2 Projeto de Experimentos Fatoriais

Montgomery (2016) define projeto de experimentos como um teste, ou uma série de testes, onde são feitas modificações nas variáveis de entrada de um processo ( $X_n$ ), com o intuito de visualizar mudanças correspondentes nas variáveis resposta ( $Y$ ), que são geralmente variáveis mensuradas na saída ou término do processo.

As variáveis de entrada de um processo, são os parâmetros controláveis que podem influenciar o desempenho do processo em estudo e também podem ser chamados de fatores do processo. Por outro lado, as variáveis resposta podem corresponder a uma ou mais características da qualidade presentes no produto (peso, dimensão ou aparência) ou informadas pelo processo (tempo de ciclo, pressão aplicada).

O experimento fatorial é utilizado quando há vários fatores (variáveis de processo) de interesse. Para cada fator em estudo são definidos níveis de variação que são valores numéricos fixos escolhidos para alterar cada fator no processo. O objetivo é variar os fatores até que todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores sejam testadas.

Como resultado dessa mudança entre os diferentes níveis espera-se encontrar variações na resposta de saída do processo. O resultado da variação de um fator pode ser chamado de efeito principal.

O número de fatores ou de níveis pode variar de acordo com o objetivo do estudo. Para manter os experimentos mais simples, é mais comum a utilização de apenas dois níveis, que podem ser chamados de alto e baixo. Quando isso ocorre, a representação do experimento fatorial é dada por  $2^k$ , onde  $k$  fatores são variados em dois níveis e esse exponencial representa o número de rodadas necessárias para completar os experimentos.

## 2.3 Projeto de Experimentos Fatoriais Fracionados

De acordo com Montgomery (2016) o tipo mais simples de planejamento  $2^k$  ocorre quando  $k=2$ . Porém, a maioria dos processos contam com mais de dois fatores. Isso acaba gerando projeto de experimentos que necessitam de muitas rodadas como, por exemplo, se  $k=5$ , seriam 32 rodadas no total para o fatorial completo.

Dependendo do processo, as 32 rodadas podem levar muito tempo para serem realizadas, consumo excessivo de material e energia, além de alocação de equipamento e mão-de-obra. As indústrias podem não ter condições de disponibilizar a realização de tal experimento em função dos custos envolvidos.

Uma alternativa para viabilizar a realização de experimentos fatoriais em ambientes industriais pode ser a escolha por uma versão fracionada do experimento fatorial completo. O uso de um fracionamento do experimento fatorial completo pode reduzir o número de combinações necessárias para que seja possível analisar os efeitos principais e os das interações de ordem inferior.

Por exemplo o planejamento fatorial  $2^{k-1}$ , que é a fração um meio do planejamento fatorial completo  $2^k$ , apresenta o mesmo número de rodadas de um fatorial completo realizado com um fator a menos. Por exemplo, um fatorial  $2^3$  completo teria um total de oito rodadas, e um meio desse mesmo fatorial ( $2^{3-1}$ ) tem-se somente 4 rodadas, reduzindo assim os custos e o tempo de duração dos experimentos.

Apesar da fração um meio de um fatorial  $2^k$  já reduzir muito o número de rodadas necessárias, frações menores podem gerar aproximadamente as mesmas informações com um custo ainda menor. Esse fatorial é chamado de  $2^{k-p}$  por ser a representação de um fatorial  $2^k$  rodado em uma fração  $k-p$ .

Outro tipo de projeto de experimentos recomendado para reduzir o número de experimentos e, portanto, reduzir tempo e custos pode ser o método de Taguchi, também denominado planejamento robusto (TAGUCHI, 1991). O planejamento robusto de Taguchi é baseado em arranjos ortogonais, correspondendo a um tipo de experimento fatorial fracionário, nos quais nem todas as combinações possíveis entre fatores e níveis são testadas. Segundo Phadke (1989) a aplicação do planejamento robusto de Taguchi possibilita a obtenção do máximo de informações sobre o efeito dos parâmetros sobre o processo com o mínimo de corridas experimentais.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A pesquisa realizada é de natureza aplicada, com objetivo exploratório e uma abordagem quantitativa. O método foi fundamentado em um estudo de caso realizado

em uma empresa do setor de dispositivos médicos localizada no município de Pelotas no estado do Rio Grande do Sul.

A pesquisa exploratória foi utilizada por possibilitar que vários aspectos sobre o tema em estudo sejam considerados. Gil (2009) ainda acrescenta que esse tipo de pesquisa proporciona um maior conhecimento sobre o problema.

Com a aplicação de um projeto de experimentos, este trabalho pode ser considerado quantitativo, já que a relação entre as variáveis envolvidas no processo é toda realizada através de análises estatísticas dos resultados. Também é considerado uma pesquisa aplicada, tendo como objetivo produzir conhecimento para a aplicação prática, voltado para solução específicas de problemas (GIL, 2009).

Com relação à escolha da modalidade de pesquisa tem-se neste projeto um estudo de caso, que segundo Fachin (2006), se caracteriza por um estudo intensivo, onde se leva em conta a compreensão do assunto investigado como um todo.

#### **4 ESTUDO DE CASO**

O estudo de caso foi realizado em uma empresa que fabrica equipamentos médico hospitalares em Pelotas no RS. Com 35 anos de atividade, a empresa conta com um parque fabril de 18 mil m<sup>2</sup>. Com uma grande matriz comercial em São Paulo, os produtos da empresa (equipos, bombas de infusão, bombas de seringa, monitores cardíacos) se encontram em mais de 2000 hospitais brasileiros.

Um dos processos de fabricação mais utilizadas nessa empresa é a injeção de materiais plásticos, setor onde foi realizado o estudo de caso. O setor conta com nove máquina injetoras com tamanhos diferentes, para que os mais diversos moldes possam ser utilizados.

Apenas uma máquina injetora foi escolhida e utilizada na realização de todas as rodadas do projeto de experimentos. A escolha da máquina foi realizada devido a disponibilidade da mesma em comparação com outras máquinas de uso exclusivo para a produção de peças com uma maior demanda que as peças escolhidas no estudo. Isso evitou a troca de moldes e assim um elevado tempo de *set up* devido ao peso e complexidade de ajustes dos moldes nas máquinas.

#### **4.1 Planejamento do Projeto de Experimentos**

Na empresa escolhida para o estudo de caso foi identificado um problema em duas peças plásticas produzidas através do método de injeção. Essas peças, chamadas de alojamento macho e fêmea, apresentavam uma dimensão maior do que a presente no projeto. Foi necessário um estudo preliminar sobre os parâmetros de maior influência no processo em estudo para possibilitar a elaboração do planejamento do projeto de experimento.

As duas peças são produzidas no mesmo molde que apresenta 24 cavidades, sendo usadas 12 cavidades para produção de cada tipo de peça (alojamento macho e fêmea). Um estudo preliminar do processo de injeção foi realizado na máquina injetora escolhida. Inicialmente, foram realizados dez ciclos de injeção totalizando 240 peças fabricadas. Foram escolhidas aleatoriamente seis cavidades do molde de cada peça a fim de relacionar as dimensões críticas das peças com os parâmetros do processo de injeção realizado nos 10 ciclos do estudo preliminar. De cada uma das cavidades, foram selecionadas cinco peças que tiveram duas de suas dimensões medidas (cota 1 e cota 2 das peças alojamento macho e alojamento fêmea), que são as dimensões mais críticas para a montagem do produto final.

Os desvios padrão dos valores das duas dimensões medidas foram calculados para cada uma das peças. Os resultados obtidos de desvio padrão médio foram 0,0070 e 0,0073 para a cota 1 e cota 2 do alojamento macho; 0,0069 e 0,0093 para a cota 1 e cota 2 do alojamento fêmea. Com os valores dos desvios padrão, foi possível calcular o número de ciclos ideal para a realização dos experimentos.

O número mínimo de ciclos foi determinado a partir das informações de desvio padrão médio das cotas das peças e para a menor diferença possível de ser medida nas cotas entre peças, sendo igual a 0,01. O número ideal de ciclos encontrado foi de oito ciclos.

#### **4.2 Variáveis do Projeto de Experimentos**

Como o objetivo do projeto de experimentos foi tentar reduzir a variabilidade nas dimensões das peças, os parâmetros ou variáveis de máquina foram estudados para encontrar aqueles que poderiam influenciar no tamanho das peças injetadas.



Uma das variáveis considerada foi o tempo de resfriamento. Essa variável de máquina foi escolhida, pois quanto mais cedo a peça é retirada do molde mais ela contrai sem limitações da cavidade, podendo gerar uma diminuição no dimensional da mesma sem que seja necessária a modificação do molde.

Outra variável de máquina que pode apresentar grande influência sobre a dimensão da peça final é a temperatura de injeção. Se o tempo de resfriamento for diminuído e a temperatura for muito alta, é possível que a peça seja extraída do molde sem estar completamente solidificada, causando sua deformação. Em contrapartida, se a temperatura estiver muito baixa, o material plastificado vai apresentar uma viscosidade maior e, como consequência, uma maior oposição a força de injeção aplicada pelo parafuso. Isso pode causar peças incompletas.

Uma forma de controlar a temperatura do material dentro do canhão pode ser realizada através da variação da velocidade de rotação do parafuso. Quanto mais rápida é essa velocidade, maior é a temperatura, já que o material passa mais vezes na parede aquecida do canhão.

Pressão de recalque e tempo de recalque interferem no grau de compactação da peça e na compensação da contração volumétrica do polímero durante o estágio inicial de resfriamento. Garantem que a peça não apresente espaços vazios causados pelo retorno do material para o bico de injeção.

Assim, as variáveis de máquina escolhidas para serem utilizadas como fatores na realização do projeto de experimentos são: tempo de resfriamento; temperatura do material (temperatura do canhão + temperatura da câmara quente); velocidade de rotação do parafuso; pressão de recalque e tempo de recalque.

### **4.3 Tipo de Projeto de Experimentos**

Neste trabalho optou-se em variar os fatores escolhidos do processo em apenas dois níveis. A elaboração de um projeto de experimentos fatorial completo com cinco variáveis variando em dois níveis ( $2^5$ ) resultaria em 32 rodadas, as quais não poderiam ser realizadas em menos de 4 turnos com 8 rodadas cada a serem realizadas na mesma máquina injetora. Por esse motivo, optou-se em utilizar uma fração do experimento fatorial completo. O Quadro 2 apresenta o experimento fatorial fracionado elaborado.

**Quadro 2-** Planejamento do Experimento do Fatorial Fracionado

<b>Planejamento do Fatorial Fracionado</b>	
Fatores	5
Resolução	III
Fração	¼
Rodadas	8
Pontos Centrais	0

**Fonte:** Autores (2017)

Para a definição dos níveis de cada parâmetro, foram analisados os valores atualmente utilizados e também aqueles recomendados para o tipo de material da peça. A temperatura do material utilizada atualmente é, em média, 240°C. O recomendado para esse material é que a temperatura fique entre 230 e 260°C, assim esses valores foram utilizados como os níveis baixo e alto deste fator.

Em relação à velocidade de rotação do parafuso, optou-se em utilizar 0,25 e 0,55 m/s, já que a mesma era em média igual a 0,40 m/s. Com um tempo de resfriamento de 15 segundos, optou-se em variar esse parâmetro para mais e para menos em 5 segundos. Para conseguir visualizar a influência da pressão de recalque na injeção, que é de 713,8 bar, foram escolhidos como níveis baixo e alto deste fator 500 e 1000 bar, respectivamente.

Como o tempo de recalque é muito pequeno (2s), e podendo variar dependendo das condições externas, então a variação de 1s para mais e para menos é suficiente. Os níveis baixo e alto escolhidos para cada fator em estudo no projeto de experimentos são apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3 -** Níveis dos fatores em estudo nos Experimento

<b>Condição</b>	<b>Temperatura do material</b>	<b>Temperatura do molde</b>	<b>Tempo de resfriamento</b>	<b>Pressão de recalque</b>	<b>Tempo de recalque</b>
1	230	0,25	10	1000	3
2	230	0,55	10	500	3
3	230	0,25	20	1000	1
4	230	0,55	20	500	1
5	260	0,25	10	500	1
6	260	0,55	10	1000	1
7	260	0,25	20	500	3
8	260	0,55	20	1000	3

**Fonte:** Autores (2017)

## 5 RESULTADOS

Foram medidas as dimensões cota 1 e cota 2 das peças alojamento macho e alojamento fêmea nas peças resultantes de cada uma das 8 rodadas do experimento fatorial fracionado realizado. Além disso, foram estudadas como variáveis resposta algumas variáveis do processo: tempo de dosagem, tempo de preenchimento, volume do colchão e pressão de injeção. As variáveis resposta selecionadas garantem que a mesma quantidade de material está sendo injetada no molde em todos os ciclos.

### 5.1 Análise das Variáveis Resposta

O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos para as médias e os desvios padrão da cada uma das variáveis resposta nas 8 rodadas do experimento realizado.

Na rodada experimental 1 os desvios padrão das variáveis resposta tempo de dosagem, volume do colchão e pressão de injeção apresentaram valores elevados. Esses valores podem ser devido a um tempo insuficiente de estabilização da máquina injetora.

Na rodada experimental 2 a baixa temperatura da câmara quente e a baixa pressão de recalque ocasionaram a não injeção de parte do molde. Com exceção da variável resposta pressão de injeção, os resultados do experimento apresentaram uma variabilidade menor do que na rodada anterior.

**Quadro 4** - Médias e Desvios Padrão das Variáveis do Processo

Rodada	Tempo de Dosagem		Tempo de Preenchimento		Volume do Colchão		Pressão de Injeção	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	5,769	0,5721	1,218	0,0046	2,834	1,1929	949,100	11,7935
2	2,273	0,0459	1,213	0,0046	11,170	0,6626	953,775	13,3794
3	5,758	0,1109	1,216	0,0052	2,965	0,2054	939,050	2,9452
4	2,400	0,0540	1,213	0,0046	12,735	0,1778	968,350	5,4290
5	4,970	0,3129	8,286	9,7192	13,595	0,0663	1195,938	27,5050
6	2,236	0,0842	2,434	3,4662	12,430	0,4596	1140,413	73,9295
7	5,526	0,0320	1,431	0,0035	13,3875	0,0750	1030,300	17,1243
8	2,554	0,0852	1,426	0,0052	10,619	0,5821	988,650	35,5536

Fonte: Autores (2017)

A rodada experimental 3 não apresentou problemas no molde. O desvio padrão obtido para as variáveis de processo foi relativamente pequeno. Já na rodada experimental seguinte, devido a baixa pressão de recalque, algumas peças ficaram trancadas no molde. Além disso, o desvio padrão de algumas variáveis resposta aumentou com relação a condição anterior.

As rodadas experimentais 5 e 6 foram as que apresentaram maior número de paradas devido a problemas na injeção. Como consequência do nível alto da temperatura e o baixo tempo de resfriamento alguns galhos não resfriavam o suficiente e acabavam grudando no molde. Isso gerou alterações no tempo de injeção e como consequência uma grande variação no tempo de preenchimento e na pressão de injeção.

O aumento do tempo de resfriamento reduziu os problemas nas rodadas experimentais sete e oito. Na rodada sete a pressão de injeção apresentou um desvio padrão alto. Porém, a rodada oito apresentou uma variação ainda maior em todas as variáveis resposta.

Em relação as variáveis dimensionais, as médias e desvios padrão das medidas são apresentadas no Quadro 5. Analisando-se o Quadro 5 pode-se verificar que as medidas dimensionais do alojamento fêmea apresentam desvios padrão maiores que as do alojamento macho.

**Quadro 5 - Médias e Desvios Padrão das Cotas**

Condição	Cota	Alojamento Macho		Alojamento Fêmea	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	1	4,3034	0,0079	4,3091	0,0108
	3	14,9919	0,0249	12,5266	0,0231
2	1	4,3056	0,0099	4,3029	0,0117
	3	14,9684	0,0162	12,5261	0,0241
3	1	4,3053	0,0075	4,2989	0,0149
	3	14,9836	0,0266	12,5221	0,0307
4	1	4,3063	0,0079	4,3024	0,0125
	3	14,9629	0,0192	12,5307	0,0266
5	1	4,3097	0,0080	4,3078	0,0144
	3	14,9761	0,0314	12,5247	0,0271
6	1	4,3088	0,0076	4,3069	0,0134
	3	14,9810	0,0267	12,5241	0,0256
7	1	4,3040	0,0085	4,3017	0,0132
	3	14,9701	0,0235	12,5134	0,0269
8	1	4,3070	0,0097	4,3141	0,0142
	3	15,0068	0,0278	12,5142	0,0241

Fonte: Autores (2017)

## 5.2 Análise de Variância

Foram realizadas as análises de variância a partir dos resultados das variáveis resposta obtidos no experimento. As análises de variância são apresentadas no Apêndice A.

O Quadro 6 do Apêndice A apresenta os resultados de análise de variância para a variável resposta tempo de dosagem. Todos os fatores estudados são significativos na variabilidade da tem-se que as variáveis com maior valor do teste de Fischer são velocidade de rotação do parafuso e a pressão de recalque. Isso pode ser explicado pelo fato do parafuso ser responsável pelo aquecimento e dosagem do material.

O Quadro 8, do Apêndice A apresenta os resultados de análise de variância para a variável resposta volume do colchão. Percebe-se que a variável de maior valor do teste de Fischer é a pressão de recalque. Isso ocorre, pois, a pressão de recalque tem a função de compensar a contração volumétrica da peça, pressionando o volume de material que sobra no canhão após a injeção. Outra variável resposta que é influenciada pela temperatura da matéria-prima é a pressão de injeção. A explicação para essa relação é, como a pressão de injeção está associada ao grau de compactação do material, a menor viscosidade torna o plástico mais fácil de ser comprimido.

Os Quadros 10 a 13 do Apêndice A apresentam as análises de variância para as variáveis resposta do produto, as cotas dimensionais de acordo com cada peça, alojamento macho e alojamento fêmea. Na variável resposta cota 1 das peças alojamento macho os parâmetros de maior valor do teste de Fischer foram as cavidades do molde e o tempo de recalque. Para a variável resposta Cota 2 os parâmetros de maior valor do teste de Fischer foram a pressão de recalque e as cavidades do molde.

Assim como nas peças alojamento macho, as cotas 1 e 2 do alojamento fêmea também são influenciadas pelas cavidades do molde. As cavidades do molde apresentaram uma elevada influência nas cotas de ambas as peças, o que pode indicar erros no dimensionamento do molde, uma vez que os valores dimensionais variam mais entre as cavidades do que entre os experimentos.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi a definição de melhorias nos parâmetros do processo de injeção em duas peças produzidas em plástico ABS com a intenção de reduzir a variabilidade das variáveis respostas do processo e do produto.

Para conseguir otimizar os parâmetros, primeiramente foi necessário entender qual era a influência dos mesmos no processo. Para este fim, foi elaborado um projeto de experimentos fatorial fracionado para 5 fatores em dois níveis, com resolução III e fração  $\frac{1}{4}$ , sem pontos centrais. O planejamento experimental fracionado resultou em 8 rodadas experimentais. Decidiu-se por utilizar somente a fração  $\frac{1}{4}$  do fatorial completo  $2^5$ . A escolha deveu-se ao fato de que a realização do experimento fatorial completo  $2^5$  resultaria em 32 rodadas, as quais não poderiam ser realizadas em menos de 4 turnos com 8 rodadas cada a serem realizadas na mesma máquina injetora.

Os 5 fatores selecionados para o experimento foram as variáveis de máquina: tempo de resfriamento, temperatura do material, velocidade de rotação do parafuso, pressão de recalque e tempo de recalque. As variáveis resposta escolhidas foram divididas em dois grupos: variáveis resposta de processo e variáveis resposta de produto. As variáveis resposta de processo foram o tempo de dosagem, o tempo de preenchimento do molde, o volume do colchão e a pressão de injeção. As variáveis resposta do produto foram as dimensões cota 1 e cota 2 das peças alojamento macho e alojamento fêmea.

Para evitar interferência de fatores externos, alguns cuidados foram tomados durante a realização do experimento. Primeiramente, todo experimento foi realizado em somente uma máquina, que ficou sendo exclusivamente usada para a realização do projeto de experimentos durante dois dias. Isso garantiu que a máquina e seus componentes não sofressem alterações necessárias à produção de outras peças. Além disso, todos os dados em todas as rodadas foram coletados pelo mesmo operador, para evitar erros na leitura dos valores fornecidos pelo sistema.

No Quadro 4 podemos visualizar na rodada 7 que somente a pressão de injeção apresentou valores elevados de desvio padrão nesta rodada experimental.

Analisando-se os testes de Fischer e os respectivos P-Values dos quadros 10 a 13 do Apêndice A, percebe-se que as cavidades do molde possuem influência

significativa na variabilidade das variáveis resposta cota 1 e cota 2 de ambas as peças alojamento macho e alojamento fêmea. Como complemento a este trabalho, sugere-se um estudo sobre o dimensional do molde das peças em questão para identificar o quanto ele precisa ser modificado e qual a variação encontrada após essa modificação.

Por fim, conclui-se que o processo de injeção de materiais plásticos é muito complexo e a determinação das melhores condições experimentais para otimização dos valores dos parâmetros de processo e produto são essenciais na garantia da qualidade. Se os parâmetros não forem utilizados corretamente de acordo com a máquina e as características do plástico utilizado, pode haver muito desperdício e problemas na injeção. Os devidos cuidados devem ser tomados para que, além de produzir peças de qualidade, o molde não seja danificado.

## REFERÊNCIAS

- BIANCHEZZI, V. **Influência dos parâmetros de injeção na tensão residual e sua consequência no comportamento mecânico de componentes termoplásticos**. 101p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.
- CADORE, E. L.; PELLANDA, G. G.; LIMA, J. F. O.; ROKS, R.; CHAVES, I. A. Utilização do planejamento de experimentos como ferramenta de otimização de um processo produtivo de injeção de dispositivos médicos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 35., 2015, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Fortaleza: ENEGEP.
- CAVALHEIRO, A. Z. **Influência dos parâmetros de moldagem na estrutura e propriedades de peças de paredes espessas e finas de polipropileno isostático injetadas em moldes-protótipo fabricados por vazamento de resina EPÓXI**. 246 f. Florianópolis: Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- FACHIN, Odília. **Fundamentos de metodologia**. 5.ed. São Paulo: Saraiva, 2006.
- FERNANDES, A. C.; FERREIRA, A. M.; JUNKES, R.; MOLINARI, E.; LEITE, J. L.; BECKERT, S. F. **Influência da “velocidade de injeção” e “tempo de recalque” nas características de peças injetadas em polipropileno**. Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. 2011.
- GALDÁMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R. Uso de técnicas de experimentação para melhoria da qualidade de moldagem plástica. In: ENEGEP. **Anais...**, Salvador: ABEPRO, 2001. Disponível em: [www.abepro.org.br/biblioteca](http://www.abepro.org.br/biblioteca) acesso em: 13 de março de 2017.
- GIL, A. C.. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas S.A., 2009.
- GOODSHIP, V. **Arburg-practical guide to injection moulding**. Rapra Technology Limited, 2004.

MELO, A.; TEN CATEN, C. S.; SANT'ANNA, A. M. O. Otimização dos parâmetros de usinagem na manufatura do ferro fundido. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.13, n. 1, p. 375-388, jan./mar. 2013. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v13i1.1200>

MELLO, C. H. P.; GUEDES, F. N.; NORONHA, V. J. M.; KAWASAKI, A. A.; ROCHA, T. E. S.; FERREIRA, J. R.; JÚNIOR, H. C. G. Análise da qualidade superficial e dimensional em peças produzidas por modelagem por deposição de material fundido (FDM). **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.10, n.3, p. 504-523, set. 2010. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v10i3.237>

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

PHADKE, S. **Quality engineering using robust design**. AT&T. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989.

TAGUCHI, G. **System of Experimental Design**.. American supplier Institute, Inc. Dearborn, Michigan, 1991. V. 1.

VIANA, D. J.; FARIA NETO, A. Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método de Taguchi. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.13, n. 4, p. 1435-1465, out./dez. 2013. DOI 10.14488/1676-1901.v13i4.1431 <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v13i4.1431>



Artigo recebido em: 22/09/2017 e aceito para publicação em 20/12/2017  
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v18i3.3010>



## APÊNDICE A

Análise de variância das variáveis respostas de acordo com os parâmetros de máquina.

**Quadro 6-** Análise de Variância do Tempo de Dosagem

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	7,3	125,88	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	1534,49	26456,9	0,000
Tempo de Resfriamento	1	8,35	143,88	0,000
Pressão de Recalque	1	12,19	210,19	0,000
Tempo de Recalque	1	5,6	96,53	0,000

**Fonte:** Autores (2017)

**Quadro 7 -** Análise de Variância do Tempo de Preenchimento

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	815,42	55,66	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	398,1	27,17	0,000
Tempo de Resfriamento	1	688,05	46,96	0,000
Pressão de Recalque	1	354,49	24,2	0,000
Tempo de Recalque	1	678,9	46,34	0,000

**Fonte:** Autores (2017)

**Quadro 8 -** Análise de Variância do Volume do Colchão

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	4048,65	9409,43	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	1883,58	4377,62	0,000
Tempo de Resfriamento	1	4,17	9,69	0,002
Pressão de Recalque	1	4610,51	10715,24	0,000
Tempo de Recalque	1	107,28	249,33	0,000

**Fonte:** Autores (2017)

**Quadro 9 -** Análise de Variância da Pressão de Injeção

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	2824913	2680,56	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	50499	47,92	0,000
Tempo de Resfriamento	1	968079	918,61	0,000
Pressão de Recalque	1	168432	159,83	0,000
Tempo de Recalque	1	940465	892,41	0,000

**Fonte:** Autores (2017)

**Quadro 10 - Análise de Variância da Cota 01 do Alojamento Macho**

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	0,0006864	19,89	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	0,0002707	7,85	0,005
Tempo de Resfriamento	1	0,0001663	4,82	0,029
Pressão de Recalque	1	0,0000145	0,42	0,518
Tempo de Recalque	1	0,0012286	35,61	0,000
Cavidades AM	11	0,0022261	64,52	0,000

Fonte: Autores (2017)

**Quadro 11 - Análise de Variância da Cota 02 do Alojamento Macho**

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	0,014489	72,53	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	0,003043	15,23	0,000
Tempo de Resfriamento	1	0,001334	6,68	0,010
Pressão de Recalque	1	0,103791	519,54	0,000
Tempo de Recalque	1	0,014712	73,64	0,000
Cavidades AM	11	0,029584	148,09	0,000

Fonte: Autores (2017)

**Quadro 12 - Análise de Variância da Cota 01 do Alojamento Fêmea**

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	0,0029324	59,38	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	0,0006186	12,53	0,000
Tempo de Resfriamento	1	0,0011016	22,31	0,000
Pressão de Recalque	1	0,0026568	53,8	0,000
Tempo de Recalque	1	0,0016515	33,44	0,000
Cavidades AF	11	0,0093346	189,03	0,000

Fonte: Autores (2017)

**Quadro 13 - Análise de Variância da Cota 02 do Alojamento Fêmea**

Parâmetros	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados Ajustada	Resultado Teste F	P-Value
Temperatura do Material	1	0,011389	132,88	0,000
Vel. de Rotação do Parafuso	1	0,000657	7,66	0,006
Tempo de Resfriamento	1	0,00615	71,75	0,000
Pressão de Recalque	1	0,000537	6,26	0,013
Tempo de Recalque	1	0,005388	62,86	0,000
Cavidades AF	11	0,041532	484,56	0,000

Fonte: Autores (2017)