



# ANÁLISE DE EMPENAMENTO DE PRODUTOS INJETADOS COM O USO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Lincoln Rogério Garcia, [lincolnrgarcia@gmail.com](mailto:lincolnrgarcia@gmail.com)

Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli, [carlos.sacchelli@gmail.com](mailto:carlos.sacchelli@gmail.com)

Prof. Dra. Sueli Fischer Beckert, [sueli.f@ufsc.br](mailto:sueli.f@ufsc.br)

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

**Resumo:** O processo de injeção de termoplásticos é grandemente utilizado nos produtos manufaturados atualmente. Neste processo há vários parâmetros que devem ser manipulados para que os produtos gerados sejam obtidos com qualidade. Assim, o objetivo deste artigo será apresentar um planejamento experimental de um estudo envolvendo o empenamento de um produto injetado. No decorrer do artigo, será apresentada a abordagem aplicada para a coleta dos dados e sistemas de medição utilizados, bem como os resultados obtidos. Neste trabalho as ferramentas CAD/CAE serão aplicadas para auxiliar e conduzir os experimentos em ambientes virtuais.

**Palavras-chave:** Termoplásticos, Planejamento Experimental, Produtos Injetados, CAD/CAE.

## 1. INTRODUÇÃO

A globalização e o fácil acesso à tecnologia tornaram as empresas muito mais competitivas e, nesta corrida pela venda de produtos manufaturados, a melhoria no processo de desenvolvimento de novos produtos tem se tornado uma grande estratégia. Há alguns anos, o ciclo de desenvolvimento de um novo produto poderia se arrastar por vários meses ou anos, hoje o mercado competitivo fez com que esse tempo fosse reduzido, sendo criadas diversas ferramentas computacionais para auxiliar a equipe de desenvolvimento na tomada de decisões.

Mais especificamente, a utilização das ferramentas CAD/CAE tem contribuído significativamente para acelerar o desenvolvimento de novos produtos, pois permitem que modelos tridimensionais paramétricos sejam utilizados para visualização de detalhes que na antiga prancheta de desenho não era possível. Ainda hoje, entre os processos de fabricação mais utilizados destaca-se o processo de injeção de termoplásticos. Diante deste cenário, neste trabalho foram conduzidas simulações de experimentos utilizando ferramentas CAD/CAE, com o objetivo de se aplicar técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria qualidade de um processo de injeção polimérica de uma prateleira utilizada na porta da geladeira.

Para tanto, foi necessário planejar, executar e analisar um experimento onde foram manipulados fatores inerentes ao processo de injeção. Dentre as variáveis de respostas selecionadas, a principal foi avaliar o empenamento após a moldagem, que é uma variável diretamente relacionada com a qualidade percebida pelo consumidor. Os principais objetivos deste estudo são descritos abaixo:

- ✓ Estudar e compreender as técnicas de planejamento e análise de experimentos;
- ✓ Identificar quais são os parâmetros de processo mais significativos que influenciam no empenamento;
- ✓ Determinar quais são os melhores valores para os parâmetros de processo visando minimizar o empenamento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de injeção de moldes é o mais utilizado para manufatura de produtos plásticos por sua boa eficiência, alto desempenho e pela possibilidade de fabricação de peças complexas. Um processo de injeção comum geralmente envolve o enchimento, o recalque, a refrigeração e a extração. (WANG; ZHAO; WANG, 2014)

Idayu et al. (2017) explica que basicamente existem cinco parâmetros significativos que geram variação no processo de injeção, são eles: a temperatura do molde, a temperatura de injeção, a pressão de recalque, o tempo de recalque e o tempo de refrigeração. O autor ainda cita que problemas de qualidade como empenamento, contração, linhas de solda, marca de fluxo e aprisionamentos de ar são afetados diretamente e pelos parâmetros de processo, como por exemplo, o tempo de injeção.

O empenamento é diretamente proporcional ao tempo de refrigeração e inversamente proporcional a temperatura do molde, a temperatura de injeção, a pressão de recalque e tempo de recalque. Além disso, os processos de injeção de moldes são caracterizados pela intensa interação entre projeto e análise. Para isto, são utilizados sistemas computacionais como o CAD e o CAE. O CAD possibilita ao projetista projetar um modelo tridimensional paramétrico permitindo fácil visualização dos detalhes do molde e do produto. A ferramenta CAE, do ponto de vista estrutural,

permite ao projetista analisar a resistência mecânica do molde ou do produto, quando submetido a esforços de tração, compressão e torção. Outra aplicação das ferramentas CAE está na análise de escoamento do material fundido dentro da cavidade do molde, sendo este tipo de análise capaz de capturar modos de falha em um ambiente virtual bem antes de o molde ser usinado (DENG et al., 2002).

### 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Um dos grandes problemas observados em peças injetadas, são os erros de forma, mais conhecido popularmente por empenamento. O empenamento está relacionado a maneira na qual a peça moldada contrai volumetricamente diferente, devido a fatores geométricos e parâmetros de processo, após a extração do molde.

Durante o ciclo de injeção, o material fundido é empurrado para dentro das matrizes do molde, sendo estas preenchidas volumetricamente até completar a peça. Após a injeção, inicia a fase de compactação e em seguida a refrigeração, onde acontece a troca de calor entre a peça moldada e os canais de refrigeração do molde, em seguida a peça é extraída do molde, e é neste momento em que o empenamento atua.

Características da geometria combinado com parâmetros de processo contribuem para que o empenamento seja mais acentuado ou reduzido. A grande maioria das geladeiras é composta por compartimentos destinados a acomodar os alimentos apropriadamente. A Figura (1a) ilustra um exemplo de uma geladeira com algumas prateleiras posicionadas dentro da geladeira e outras posicionadas nas portas e a Fig.(1b) ilustra a geometria de uma destas prateleiras na qual será utilizada para os estudos.



Inicialmente foram selecionados os fatores de processo que serão manipulados dentro do Experimento Planejado, que por sua vez tem o objetivo principal de avaliar a significância destes fatores escolhidos dentro dos níveis selecionados. O processo de injeção é composto de vários parâmetros de processos que afetam diferentes tipos de defeitos de moldagem. Com o objetivo de avaliar o empenamento, serão manipulados, a temperatura de injeção e refrigeração, o tempo de injeção e o perfil de recalque. A temperatura de injeção é um fator considerado importante, pois está relacionada à viscosidade do material e, portanto, foi tratada neste experimento em dois níveis distintos.

A temperatura da refrigeração também é importante, pois está relacionada à troca de calor entre a peça moldada e os canais de refrigeração que estão conectados a rede principal de água (fluido refrigerante deste experimento). O tempo de injeção está relacionado com a velocidade na qual o material fundido preenche volumetricamente a peça, por este motivo foi considerado no experimento. O perfil de recalque, composto pela pressão de recalque e pelo tempo de recalque são importantes, pois estão relacionados com a compactação da peça e, por consequência, influenciam diretamente no empenamento.

Considerando os parâmetros citados anteriormente, a Tab.(1) descreve quais os fatores que serão testados no experimento bem como os níveis nos quais serão manipulados. Para este experimento foram selecionados 5 fatores de dois níveis e 16 rodadas, ou seja, um experimento fracionado  $2^{5-1}$  e resolução V. Neste caso, os graus de liberdade do experimento ou estrutura de confundimento é dada por: A, B, C, D, E, AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE, DE.

**Tabela 1. Planejamento do Experimento**

| ID | Fatores                | Unidade | (-1) | (+1) |
|----|------------------------|---------|------|------|
| A  | Temperatura de Injeção | [°C]    | 220  | 250  |
| B  | Temperatura da Água    | [°C]    | 25   | 45   |
| C  | Tempo de Injeção       | [s]     | 2    | 5    |
| D  | Pressão de Recalque    | [%]     | 60   | 90   |
| E  | Tempo de Recalque      | [s]     | 3    | 10   |

Todo experimento é composto por fatores nos quais serão manipulados e variáveis de resposta nas quais serão controladas. As variáveis de resposta deste experimento podem ser visualizadas na Tab.(2) abaixo e são utilizadas para monitorar os efeitos da manipulação dos fatores do experimento.

**Tabela 2. Variáveis de Resposta do Experimento**

| ID        | Descrição da Variável de Resposta         | Unidade |
|-----------|-------------------------------------------|---------|
| All       | Deformação, Todos os Efeitos Considerados | [mm]    |
| DC        | Deformação, Resfriamento Diferencial      | [mm]    |
| DS        | Deformação, Contração Diferencial         | [mm]    |
| OE        | Deformação, Efeitos de Orientação         | [mm]    |
| CE        | Deformação, Efeitos de Canto              | [mm]    |
| Pres.V/P  | Pressão na Fase de Comutação V/P          | [MPa]   |
| dT        | Temperatura da Frente de Fluxo            | [°C]    |
| Pres.@End | Pressão no Final do Preenchimento         | [MPa]   |

A maioria das variáveis de resposta diz respeito à deformação, ou seja, neste caso identificado comumente por empenamento. A Figura (2) ilustra a face inferior da prateleira para a medição do empenamento. É importante que o empenamento esteja dentro dos limites de especificações do projeto, neste caso, conforme NBR-2768 sendo o nível de tolerância especificado na condição média “m”.



**Figura 2. Face Plana Inferior para medir o Empenamento em destaque com linha tracejada**

Após estas etapas estabelecidas, foi criada a matriz ortogonal do experimento, que é uma matriz na qual são ilustradas quais as combinações de rodadas serão executadas no experimento. Para melhor entendimento e análise, cada fator recebeu uma identificação alfabética.

A matriz está preenchida com os códigos (-1) e (+1), que representam em qual nível as rodadas são testadas, os níveis estão descritos na Tab.(3).

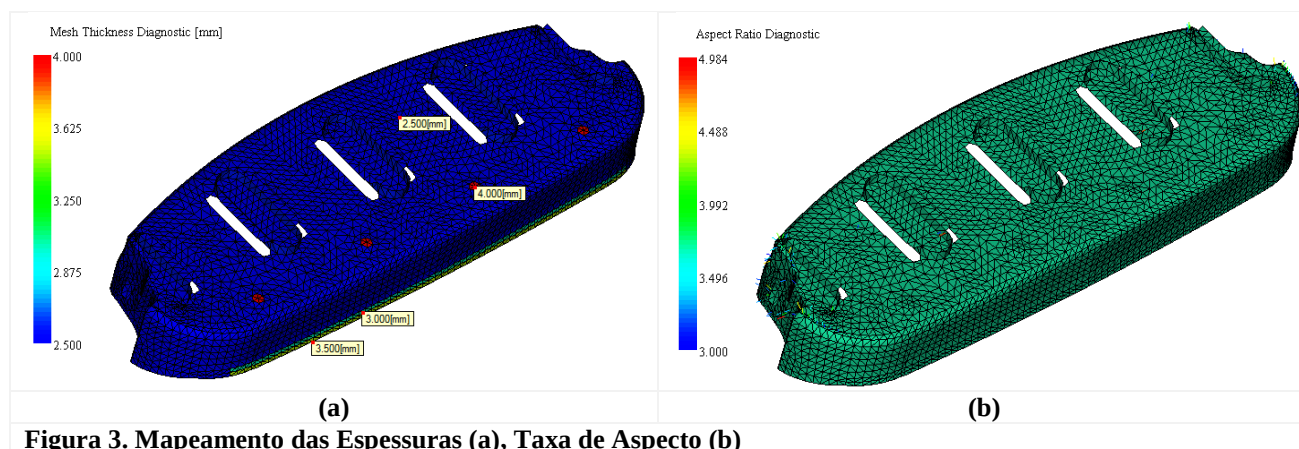
**Tabela 3. Matriz Ortogonal do Experimento**

|     | Temperatura de Injeção | Temperatura da Água | Tempo de Injeção | Pressão de Recalque | Tempo de Recalque |
|-----|------------------------|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Run | A                      | B                   | C                | D                   | E                 |
| 1   | -1                     | -1                  | -1               | -1                  | 1                 |
| 2   | 1                      | -1                  | -1               | -1                  | -1                |
| 3   | -1                     | 1                   | -1               | -1                  | -1                |
| 4   | 1                      | 1                   | -1               | -1                  | 1                 |
| 5   | -1                     | -1                  | 1                | -1                  | -1                |
| 6   | 1                      | -1                  | 1                | -1                  | 1                 |
| 7   | -1                     | 1                   | 1                | -1                  | 1                 |
| 8   | 1                      | 1                   | 1                | -1                  | -1                |
| 9   | -1                     | -1                  | -1               | 1                   | -1                |
| 10  | 1                      | -1                  | -1               | 1                   | 1                 |
| 11  | -1                     | 1                   | -1               | 1                   | 1                 |
| 12  | 1                      | 1                   | -1               | 1                   | -1                |
| 13  | -1                     | -1                  | 1                | 1                   | 1                 |
| 14  | 1                      | -1                  | 1                | 1                   | -1                |
| 15  | -1                     | 1                   | 1                | 1                   | -1                |
| 16  | 1                      | 1                   | 1                | 1                   | 1                 |

#### 4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE INJEÇÃO

Como parte da execução do experimento foi utilizada os recursos de CAE para simulação de injeção polimérica. Primeiramente, o modelo gerado no CAD foi importado para o simulador, neste projeto foi utilizado o **AUTODESK MOLDFLOW®** para simular o processo de injeção. A malha de elementos finitos foi gerada utilizando o conceito tipo *Midsurface*, no qual é extraído do modelo sólido 3D a espessura média.

A malha de elementos finitos com o mapeamento das espessuras pode ser visualizada na Fig. (3a), onde basicamente a espessura predominante é de 4,0mm. A qualidade e acuracidade dos resultados dependem muito do aspecto da malha gerada, que pode ser medida pela taxa de aspecto na qual é ilustrada pela Fig.(3b) onde quanto menor este valor melhor.



Na sequencia foram modelados o sistema de injeção e os circuitos de refrigeração do molde baseados no projeto do molde. O sistema de injeção utilizado é do tipo câmara quente, ou seja, o material fundido é transportado desde a câmara quente até tocar a peça, minimizando as perdas de cargas por temperatura.

O sistema de refrigeração é composto de canais tubulares nos quais o fluido refrigerante é transportado permitindo que ocorra uma transferência de calor entre o componente injetado e o fluido. A Figura (4) ilustra o sistema de injeção bem como o sistema de refrigeração. A simulação foi realizada selecionando as opções *Cool+Fill+Pack+Warp*, sendo o material utilizado o Poliestireno Cristal (PS).

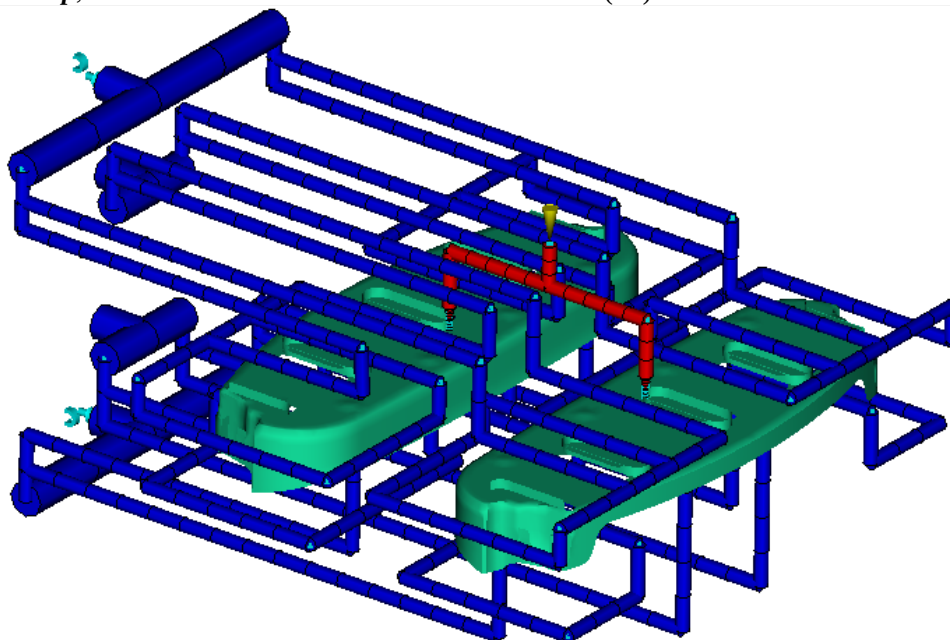


Figura 4. Sistema de Refrigeração e Canais de Injeção

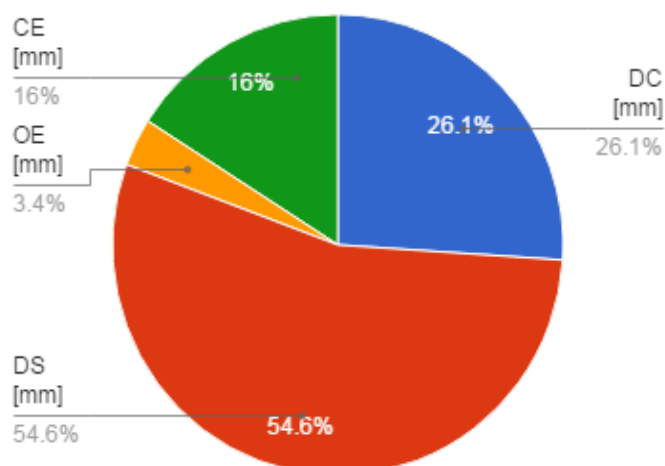
## 5. EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em ambiente virtual utilizando o simulador **AUTODESK MOLDFLOW®**, onde os fatores descritos anteriormente foram testados observando os níveis pré-estabelecidos. De acordo com o planejamento, foram realizadas 16 rodadas para entender quais dentre os fatores escolhidos são os significativos e influenciam no empenamento. A Tabela (4) ilustra a matriz ortogonal do experimento e os resultados obtidos para cada variável de resposta.

Tabela 4. Matriz do Experimento com os Resultados

| Run | Temperatura de Injeção<br>A | Temperatura da Água<br>B | Tempo de Injeção<br>C | Pressão de Recalque<br>D | Tempo de Recalque<br>E | All [mm] | DC [mm] | DS [mm] | OE [mm] | CE [mm] | Pres. V/P [Mpa] | dT [°C] | Pres.@ End [Mpa] |
|-----|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------------|---------|------------------|
| 1   | -1                          | -1                       | -1                    | -1                       | 1                      | 1,36     | 0,62    | 1,30    | 0,08    | 0,38    | 43,39           | 0,70    | 26,04            |
| 2   | 1                           | -1                       | -1                    | -1                       | -1                     | 1,91     | 0,83    | 1,35    | 0,16    | 0,70    | 32,82           | 3,20    | 19,69            |
| 3   | -1                          | 1                        | -1                    | -1                       | -1                     | 1,62     | 0,37    | 1,33    | 0,10    | 0,81    | 42,29           | 1,50    | 25,37            |
| 4   | 1                           | 1                        | -1                    | -1                       | 1                      | 1,50     | 0,43    | 1,30    | 0,07    | 0,47    | 31,91           | 2,80    | 19,15            |
| 5   | -1                          | -1                       | 1                     | -1                       | -1                     | 1,35     | 0,64    | 1,29    | 0,06    | 0,32    | 46,82           | 19,10   | 28,09            |
| 6   | 1                           | -1                       | 1                     | -1                       | 1                      | 1,38     | 0,73    | 1,23    | 0,09    | 0,39    | 35,39           | 28,60   | 21,23            |
| 7   | -1                          | 1                        | 1                     | -1                       | 1                      | 1,39     | 0,34    | 1,25    | 0,13    | 0,34    | 44,55           | 18,10   | 26,73            |
| 8   | 1                           | 1                        | 1                     | -1                       | -1                     | 1,69     | 0,46    | 1,25    | 0,08    | 0,86    | 33,69           | 26,90   | 20,21            |
| 9   | -1                          | -1                       | -1                    | 1                        | -1                     | 1,44     | 0,66    | 1,27    | 0,17    | 0,37    | 43,39           | 1,70    | 39,05            |
| 10  | 1                           | -1                       | -1                    | 1                        | 1                      | 1,29     | 0,73    | 1,24    | 0,06    | 0,28    | 32,62           | 3,20    | 29,54            |
| 11  | -1                          | 1                        | -1                    | 1                        | 1                      | 1,27     | 0,33    | 1,20    | 0,11    | 0,26    | 42,29           | 1,50    | 38,06            |
| 12  | 1                           | 1                        | -1                    | 1                        | -1                     | 1,70     | 0,47    | 1,35    | 0,05    | 0,91    | 31,91           | 2,80    | 28,72            |
| 13  | -1                          | -1                       | 1                     | 1                        | 1                      | 1,22     | 0,60    | 1,20    | 0,08    | 0,33    | 46,82           | 19,10   | 42,14            |
| 14  | 1                           | -1                       | 1                     | 1                        | -1                     | 1,83     | 0,79    | 1,30    | 0,12    | 0,55    | 35,39           | 28,60   | 31,85            |
| 15  | -1                          | 1                        | 1                     | 1                        | -1                     | 1,31     | 0,34    | 1,10    | 0,09    | 0,49    | 44,55           | 18,10   | 40,10            |
| 16  | 1                           | 1                        | 1                     | 1                        | 1                      | 1,21     | 0,42    | 1,18    | 0,15    | 0,29    | 33,69           | 26,90   | 30,32            |

No Gráfico (1), é observado que dentre as variáveis de resposta relacionadas para relacionadas ao empenamento, a maior contribuidora é a Deformação, Contração Diferencial representada pela sigla “DS”, com 54,6% de influência. Sendo assim, considerando também que todas as variáveis estavam na mesma unidade de medida, esta variável foi escolhida para ser analisada em detalhe mais adiante.



**Gráfico 1. Contribuição das Variáveis de Resposta relacionadas ao Empenamento**

## 6. ANÁLISE DO EXPERIMENTO

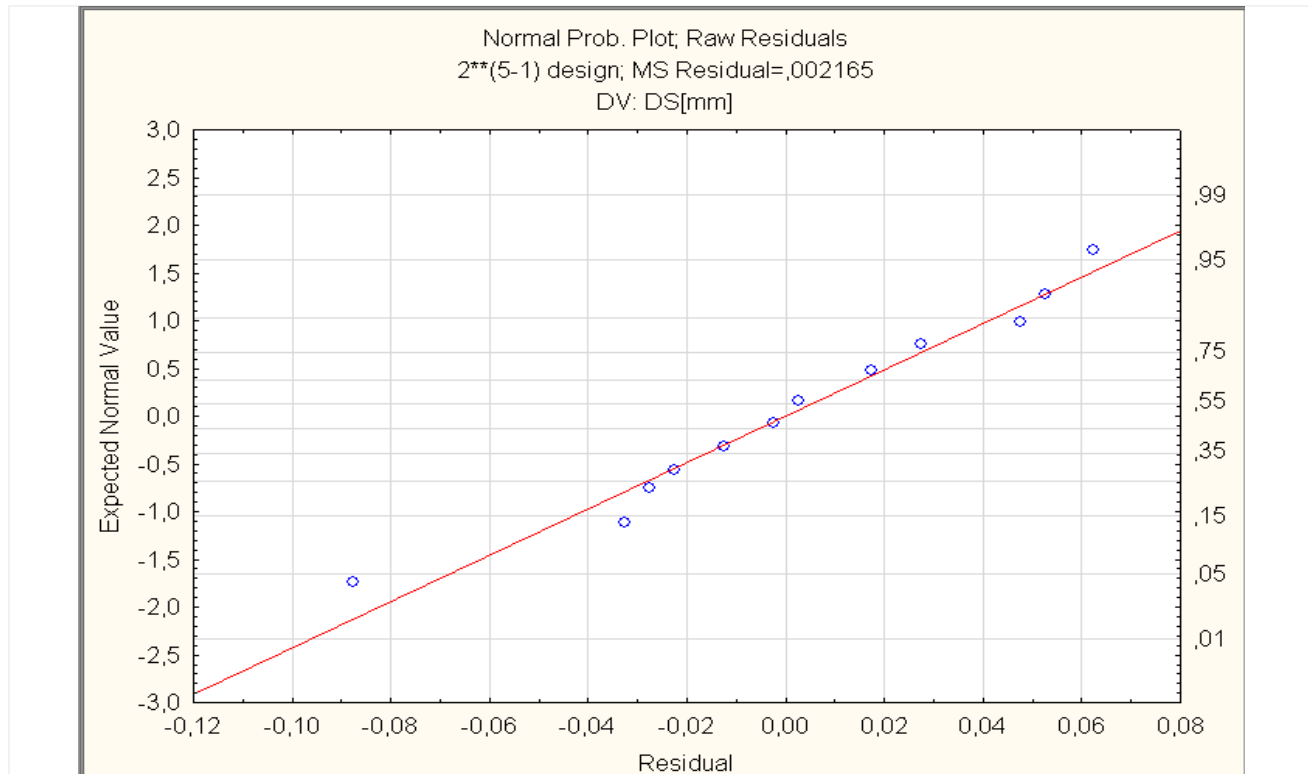
A análise dos dados coletados foi realizada utilizando o **STATISTICA®**, que é um programa completo, integrado para análise de dados, gráficos, gerenciamento de banco de dados, e sistema de desenvolvimento de aplicações customizadas com uma grande variedade de procedimentos básicos e avançados de análise de modelos relacionados a negócios, ciências e aplicações de engenharia.

Como é um experimento fracionado, a análise do experimento é do tipo  $2^{(k-p)}$ , sendo  $k=5$  e  $p=1$ , portanto o experimento é do tipo  $2^{(5-1)}$  e com 16 rodadas. Inicialmente foi feita uma análise dos resultados dos resíduos, onde foram avaliados os resíduos inerentes a variável de resposta Deformação, Contração Diferencial [DS]. A Tabela (5) mostra como ficaram os resíduos observados, onde é observado que o resíduo é baixo comparando com os valores observados.

**Tabela 5. Análise dos Resíduos**

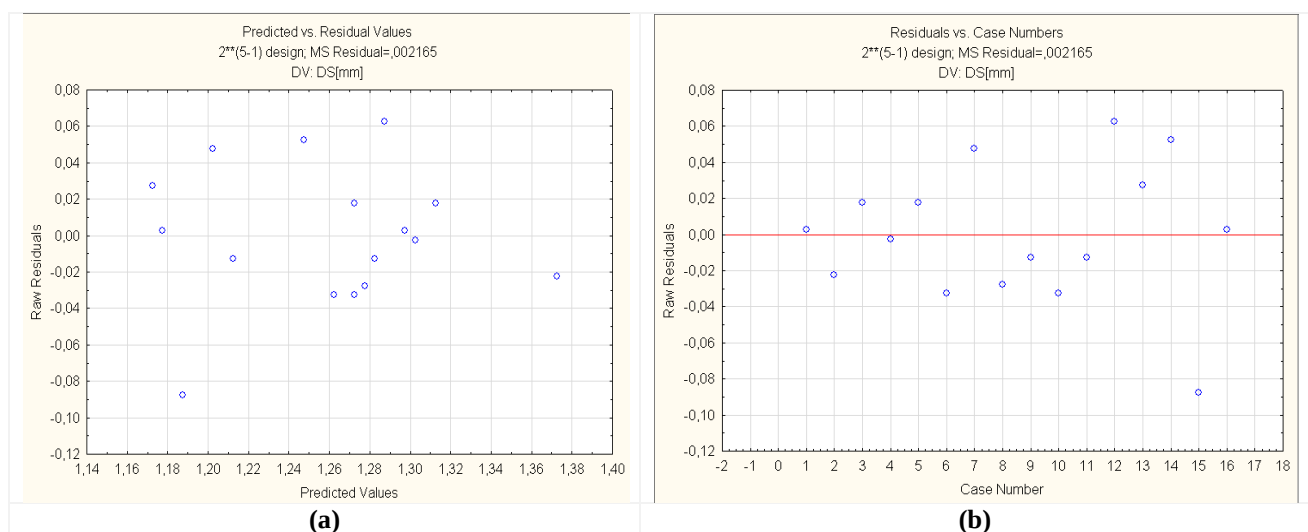
| Case or Run | Observed, Predicted, and Residual Values (Design: 2**(5-1) design ([No active dataset]) in DOE_20160627_b) |          |           |  |  |  |  |  |  |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|--|--|--|--|--|--|
|             | Observed                                                                                                   | Predictd | Resids    |  |  |  |  |  |  |
| 1           | 1,300000                                                                                                   | 1,297500 | 0,002500  |  |  |  |  |  |  |
| 2           | 1,350000                                                                                                   | 1,372500 | -0,022500 |  |  |  |  |  |  |
| 3           | 1,330000                                                                                                   | 1,312500 | 0,017500  |  |  |  |  |  |  |
| 4           | 1,300000                                                                                                   | 1,302500 | -0,002500 |  |  |  |  |  |  |
| 5           | 1,290000                                                                                                   | 1,272500 | 0,017500  |  |  |  |  |  |  |
| 6           | 1,230000                                                                                                   | 1,262500 | -0,032500 |  |  |  |  |  |  |
| 7           | 1,250000                                                                                                   | 1,202500 | 0,047500  |  |  |  |  |  |  |
| 8           | 1,250000                                                                                                   | 1,277500 | -0,027500 |  |  |  |  |  |  |
| 9           | 1,270000                                                                                                   | 1,282500 | -0,012500 |  |  |  |  |  |  |
| 10          | 1,240000                                                                                                   | 1,272500 | -0,032500 |  |  |  |  |  |  |
| 11          | 1,200000                                                                                                   | 1,212500 | -0,012500 |  |  |  |  |  |  |
| 12          | 1,350000                                                                                                   | 1,287500 | 0,062500  |  |  |  |  |  |  |
| 13          | 1,200000                                                                                                   | 1,172500 | 0,027500  |  |  |  |  |  |  |
| 14          | 1,300000                                                                                                   | 1,247500 | 0,052500  |  |  |  |  |  |  |
| 15          | 1,100000                                                                                                   | 1,187500 | -0,087500 |  |  |  |  |  |  |
| 16          | 1,180000                                                                                                   | 1,177500 | 0,002500  |  |  |  |  |  |  |

Na sequência é realizada uma análise dos resíduos utilizando um gráfico de Probabilidade Normal específico para resíduos, onde é observado que estão normalmente distribuídos, conforme ilustrado na Fig.(5) abaixo.



**Figura 5. Probabilidade Normal dos Resíduos**

Na Figura (6a) é apresentada uma análise comparativa entre os valores previstos e os resíduos, sendo observado que a dispersão dos resíduos é pequena, como pode ser visto na escala vertical. Na Figura (6b) são apresentados os resíduos distribuídos ao longo das observações, nota-se que nas rodadas 12 e 14 os resíduos são maiores.



**Figura 6. Predicted vs. Residual Values (a) , Residuals Values vs. Case Numbers (b)**

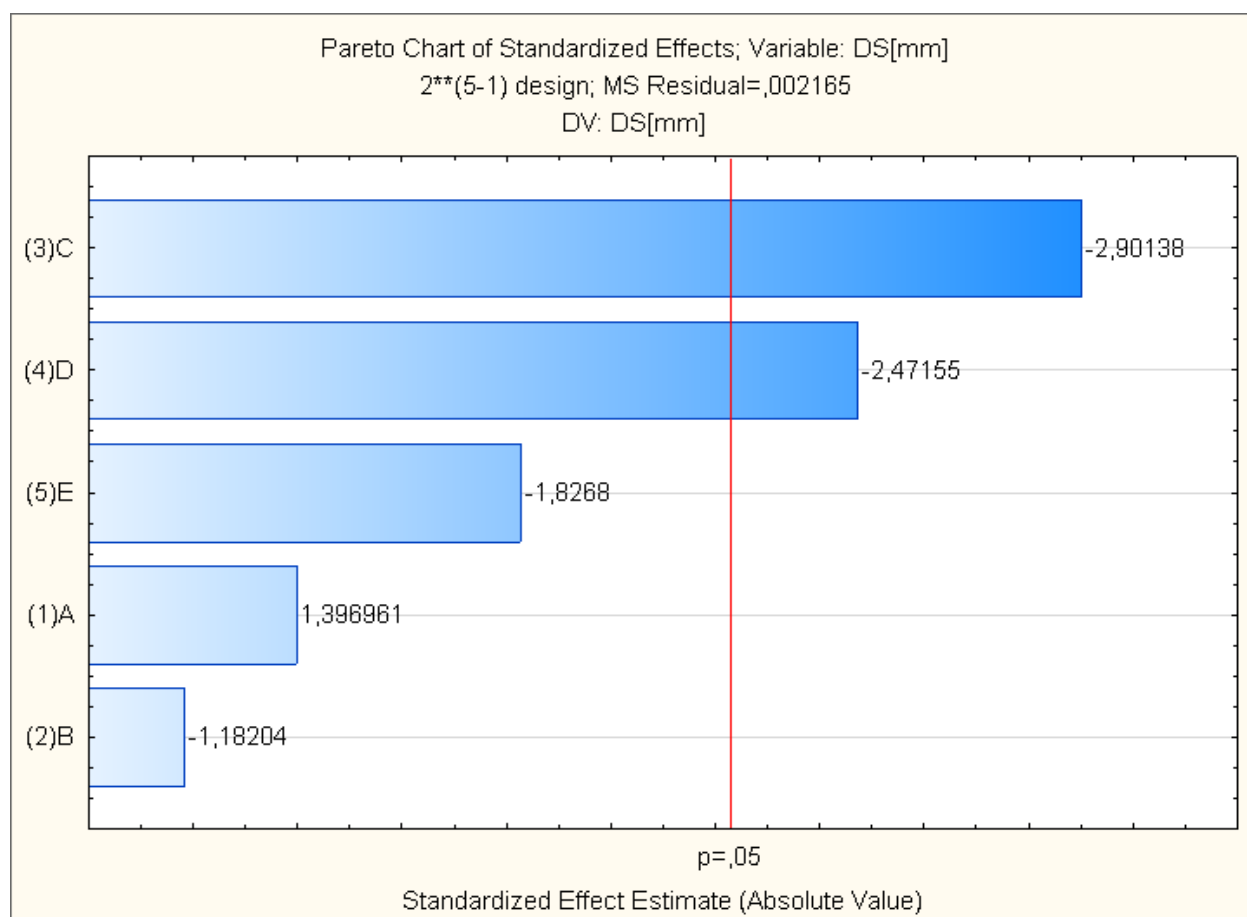


Após a análise de resíduos, foram realizadas a Análise de Variância (ANOVA), a Tab. (6) abaixo ilustra esta análise onde é observado os fatores mais importantes baseados num critério de significância de 0,05 são: Fator C, que está relacionado ao Tempo de Injeção [s], e o Fator D, que está relacionado a Pressão de Recalque [%].

**Tabela 6. Análise de Variância do Modelo Completo**

| ANOVA; Var.:DS[mm]; R-sqr=,67962; Adj: ,51942 (Design: 2**(5-1) design ([No active dataset]) in DOE_20160627_b)<br>2**(5-1) design; MS Residual=,002165<br>DV: DS[mm] |          |    |          |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| Factor                                                                                                                                                                | SS       | df | MS       | F        | p        |
| (1)A                                                                                                                                                                  | 0,004225 | 1  | 0,004225 | 1,951501 | 0,192651 |
| (2)B                                                                                                                                                                  | 0,003025 | 1  | 0,003025 | 1,397229 | 0,264533 |
| (3)C                                                                                                                                                                  | 0,018225 | 1  | 0,018225 | 8,418014 | 0,015796 |
| (4)D                                                                                                                                                                  | 0,013225 | 1  | 0,013225 | 6,108545 | 0,033017 |
| (5)E                                                                                                                                                                  | 0,007225 | 1  | 0,007225 | 3,337182 | 0,097686 |
| Error                                                                                                                                                                 | 0,021650 | 10 | 0,002165 |          |          |
| Total SS                                                                                                                                                              | 0,067575 | 15 |          |          |          |

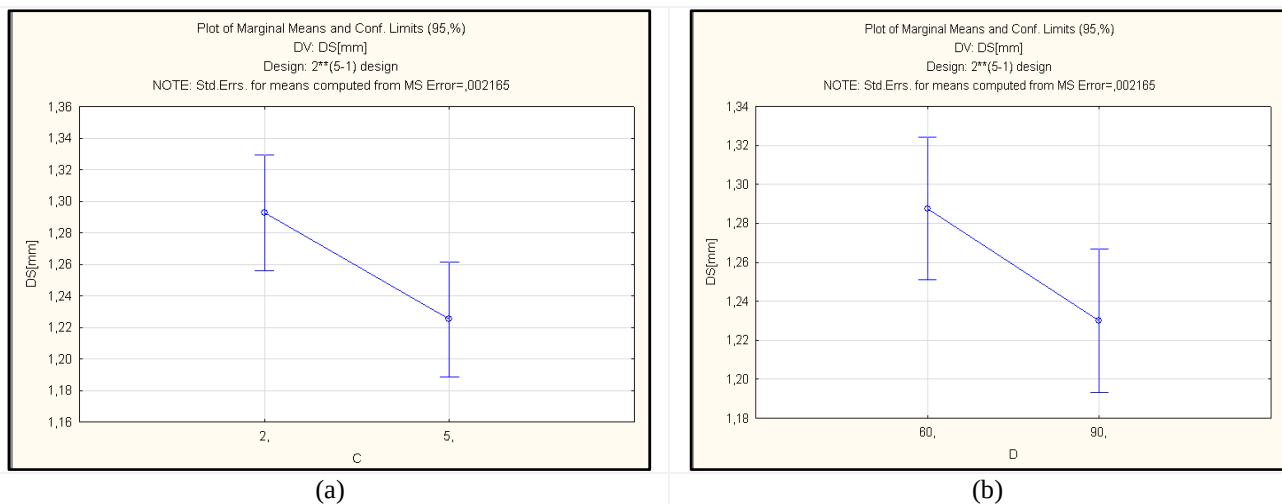
Posteriormente, foi realizada uma Análise de Pareto, onde foi confirmado que os fatores C e D realmente são significativos dentro de um limite de significância de 5%, a Fig.(7) abaixo ilustra os fatores significativos.



**Figura 7. Análise de Pareto**



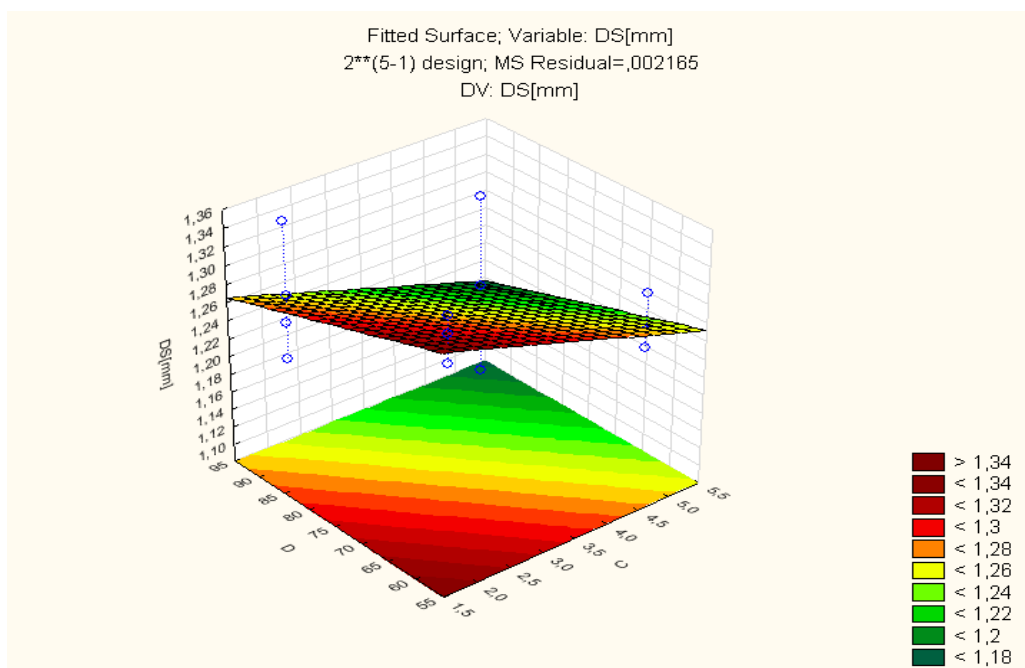
Na Figura (8a) pode-se observar como ficou a média para o Fator C (Tempo de Injeção [s]), nota-se que para valores de Tempo de Injeção maiores, o efeito da variável de resposta tende a ser minimizado, ou seja, quando a Prateleira é injetada mais lentamente, a variável de resposta Deformação, Contração Diferencial [DS] é afetada para produzir um empenamento menor. Este efeito está relacionado ao fato de que velocidades de injeção menor tende a tencionar menos as moléculas dos polímeros. A Figura (8b) ilustra o efeito do Fator D (Pressão de Recalque [%]), nota-se que na medida em que a Pressão de Recalque aumenta o efeito na variável de resposta “Deformação, Contração Diferencial [DS]” é minimizado. Isto ocorre porque a Prateleira será mais bem compactada, ou seja, as moléculas serão melhores acomodadas, promovendo um empenamento menor.



**Figura 8. Média para o Fator Significativo C e Média para o Fator Significativo D**

Outra maneira de analisar a variável de resposta está em utilizar a Superfície de Resposta. A Figura (9) permite visualizar em 3D esta mesma superfície de resposta. Nesta análise, à medida que se caminha na escala horizontal do Fator C para a direita, e se sobe na escala vertical do Fator D, os valores de empenamento são minimizados.

Uma analogia que pode ser feita é: “Quão longe se pode aumentar o Fator C, Tempo de Injeção, e aumentarmos o Fator D, Pressão de Recalque, para atingir valores de empenamento menores?”. Parece interessante estar na região verde escuro se o objetivo é minimizar a variável de resposta.

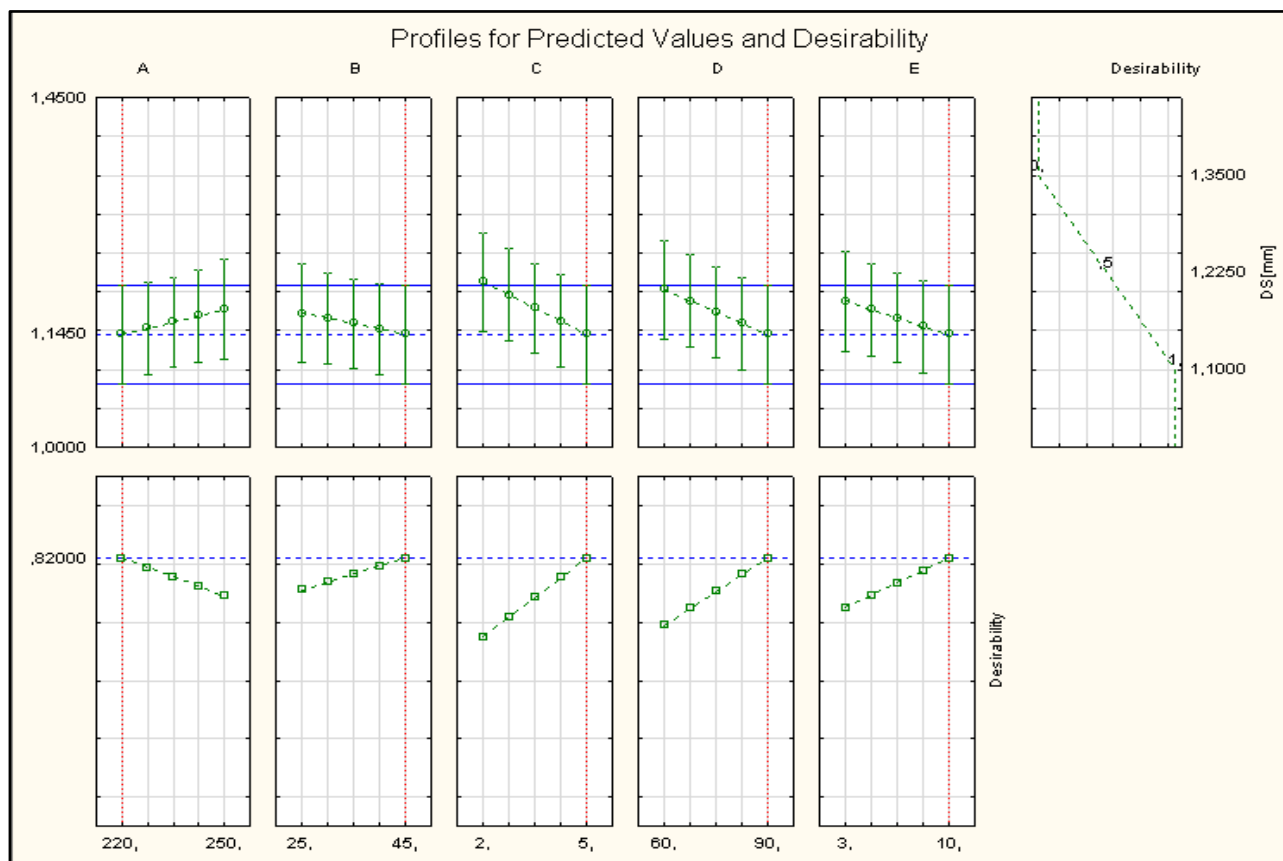


**Figura 9. Superfície de Resposta em 3D**

Baseando-se nos resultados apresentados, e tendo o conhecimento dos fatores significativos, uma das etapas finais é otimizar a variável de resposta, ou seja, através da configuração dos limites superiores e inferiores buscar um valor ótimo para a variável de resposta desejada.

O resultado da otimização é ilustrado na Fig.(10) onde se pode notar que a média combinando todos os fatores caiu para 1,14mm. Esta ferramenta de otimização é importante, pois permite realizar os ajustes de todos os fatores simultaneamente.

Para efeitos experimentais e conclusivos, quando combinados os fatores A em 220°C, o Fator B em 45°C, o Fator C em 5s, o Fator D em 90% e o Fator E em 10s, é possível atingir valores de empenamento baixos e aceitáveis.



**Figura 10. Modelo Otimizado para Minimizar a Variável de Resposta**

Ao final do experimento, um modelo de regressão foi elaborado, baseado somente nos fatores significativos observados, ou seja, somente nos fatores C e D e como, resultado, se tem a equação ilustrada na Fig.(11), onde é observado um valor médio subtraído de uma constante que é multiplicado pelos fatores significativos.

Prediction Formula:  $=1,48125-0,0225*"C"-0,00191667*"D"$

**Figura 11. Modelo de Regressão dos Fatores Significativos**



## 7. CONCLUSÃO

Atualmente a utilização de Experimentos Planejados tem se mostrado cada vez mais relevante, como sendo uma ferramenta importante para decisões de projeto. Por meio de Experimentos Planejados, vários modelos podem ser testados e manipulados de várias maneiras com objetivo de entender o comportamento de variáveis de respostas mediante a manipulação destes fatores.

Além disso, a combinação das ferramentas de Estatística e aplicações de CAD/CAE tem crescido significativamente nas indústrias, pois permitem que o Engenheiro e o Projetista testem vários conceitos e obtenham uma resposta estatisticamente coerente com o objetivo do estudo.

Este artigo nos permitiu planejar, executar e analisar um experimento para avaliar o empenamento inerente ao processo de injeção polimérica de uma prateleira utilizada em uma geladeira. O estudo e a compreensão do experimento foram alcançados, permitindo que o experimento fosse conduzido de acordo com o planejado, não havendo problemas na execução bem como nas configurações dos fatores e níveis.

Foram identificados quais os parâmetros de processo que são mais significativos para minimizar o empenamento, bem como por meio de análise no **STATISTICA®** pode-se determinar qual combinação destes fatores significativos permitem minimizar a variável de resposta.

O empenamento é uma variável de resposta importante para garantir que a qualidade percebida pelo consumidor seja a melhor possível. Ao final dos estudos, entender como estes fatores combinados podem contribuir para minimizar a variável de resposta foi importante para o nosso entendimento da importância de utilizar essas ferramentas de estatística associadas às ferramentas de CAD/CAE.

## 8. REFERÊNCIAS

DENG, Y. M. et al. A CAD-CAE integrated injection molding design system. **Engineering with Computers**, v. 18, n. 1, p. 80–92, 2002.

IDAYU, N. et al. OPTIMISATION OF PROCESS PARAMETERS IN LINEAR RUNNER FAMILY INJECTION MOLD USING MOLDFLOW SIMULATION SOFTWARE. v. 11, n. 4, p. 2475–2482, 2017.

WANG, G. LONG; ZHAO, G. QUN; WANG, X. XIN. Heating/cooling channels design for an automotive interior part and its evaluation in rapid heat cycle molding. **Materials and Design**, v. 59, p. 310–322, 2014.

Moldflow Online Help, 2012, **Moldflow Corporation**.

Dell Inc. (2015). **Dell Statistica** (data analysis software system), version 13. software.dell.com.