

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE  
MATERIAIS

BRUNO ALEXANDRO BEWZENKO CORDOVA

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DO  
ABS VIA MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Ponta Grossa

2018

BRUNO ALEXANDRO BEWZENKO CORDOVA

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DO  
ABS VIA METODOS ESTATISTICOS

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Área de Concentração: Processamento de Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Benjamim de Melo Carvalho

Ponta Grossa

2018

**Ficha Catalográfica**  
**Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG**

C796      Cordova, Bruno Alexandre Bewzenko  
Otimização do processo de moldagem por  
injeção do ABS via métodos estatísticos/  
Bruno Alexandre Bewzenko Cordova. Ponta  
Grossa, 2018.  
184f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e  
Ciência de Materiais - Área de  
Concentração: Desenvolvimento e  
Caracterização de Materiais), Universidade  
Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Benjamim de Melo  
Carvalho.

1.Moldagem por injeção. 2.Taguchi.  
3.Superfície de resposta. 4.ABS.  
I.Carvalho, Benjamim de Melo. II.  
Universidade Estadual de Ponta Grossa.  
Mestrado em Engenharia e Ciência de  
Materiais. III. T.

CDD: 620.192

# OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DO ABS VIA METODOS ESTATISTICOS

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Engenharia e  
Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de  
Processamento de Materiais.

Ponta Grossa, 30 de janero de 2018.



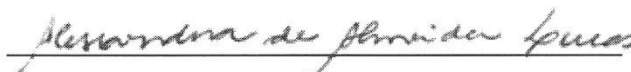
---

Prof. Dr. Benjamim, de Melo Carvalho  
DEMA-UEPG



---

Prof. Dr. Luis Antonio Pinheiro  
DEMA-UEPG



---

Profª. Dra. Alessandra de Almeida Passos  
DEMa-UFSCAR

## RESUMO

A moldagem por injeção é um dos processos mais versáteis e amplamente empregada na manufatura de polímeros. Entretanto, há uma incidência de tantos fatores que tendem a influenciar o processo, ao ponto que um controle rigoroso dos parâmetros do processo se faz necessário para obtenção de peças com nível de qualidade adequada. Neste estudo, foram avaliadas as relações entre condições de processo, microestrutura e propriedades para o polímero Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS). Para tal, o ABS foi injetado em 9 condições, variando-se importantes parâmetros de injeção: temperatura do fundido (entre 210 e 240 °C), temperatura do molde (45 – 65 °C), pressão de compactação (150 - 250 bar) e velocidade de injeção (50 – 110 cm<sup>3</sup>/s). A partir dos resultados das propriedades mecânicas obtidas (Resistência sob Tração, Resistência ao Impacto, Módulo Elástico e Força Máxima sob Impacto), foram desenvolvidos 3 modelos de predição, determinados via Método Taguchi, Superfície de Resposta e Regressão Linear, sendo que o Método Taguchi apresentou maior eficácia. A partir dos modelos de previsão foram escolhidas 4 condições de injeção distintas da matriz ortogonal, no intuito de se verificar a precisão dos modelos criados. A microestrutura foi avaliada através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostras fraturadas por impacto instrumentado e pela medição dos domínios elastoméricos (distribuição do tamanho do Polibutadieno) via análise de imagem. Por fim, foi aplicado o tratamento térmico de alívio de tensões, as propriedades mecânicas foram determinadas e por fim comparadas entre presença e ausência de tratamento térmico, onde foi observado que não se apresentou efeito considerável.

**Palavras-chave:** moldagem por injeção, Taguchi, Superfície de Resposta, ABS.

## ABSTRACT

Injection molding is one of the most versatile and widely used processes in the manufacture of polymers. However, there is an incidence of so many factors that tend to influence the process, to the point that strict control of the process parameters is necessary to obtain pieces with adequate quality level. In this study, the relationships between process conditions, microstructure and properties for acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) polymer were evaluated. To do this, ABS was injected under 9 conditions, varying important injection parameters: melt temperature (between 210 and 240 °C), mold temperature (45-65 °C), compression pressure (150-250 bar) and injection rate (50-110 cm<sup>3</sup> / s). From the results of the mechanical properties obtained (Resistance under Traction, Impact Resistance, Elastic Modulus and Maximum Force under Impact), 3 prediction models were developed, determined by the Taguchi Method, Response Surface and Linear Regression, with the Taguchi Method was more effective. From the prediction models four different injection conditions of the orthogonal matrix were chosen, in order to verify the accuracy of the models created. The microstructure was evaluated by Scanning Electron Microscopy (SEM) of fractured samples by instrumented impact and by the measurement of the elastomeric domains (distribution of the polybutadiene size) through image analysis. Finally, the thermal treatment of stress relief was applied, the mechanical properties were determined and finally compared between the presence and absence of heat treatment, where it was observed that no considerable effect was observed.

**Keywords:** Injection Molding, Taguchi, Response Surface, ABS.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor Doutor Benjamim de Melo Carvalho, pela oportunidade de realização do mestrado, pelos ensinamentos, pela sua capacidade e dedicação à profissão e, sobretudo, sua compreensão e paciência.

Aos meus pais, pelo apoio, incentivo pela perseverança e, principalmente pela cobrança a qual proporcionou a continuidade dos estudos até a chegada a este mestrado.

À minha avó Neiva Cordova (in memoriam), pelo seu apoio e incentive durante a realização do meu mestrado, assim como durante todos meus anos de estudo desde o colégio.

Aos Professores Doutores Luís Antonio Pinheiro e Lucas Máximo Alvez, pela amizade e pelas orientações e experiências que muito contribuíram para a concretização desse estudo.

Aos agentes universitários, administrativos e aqueles que auxiliaram na parte experimental, pela colaboração e ajuda. Grato pela atenção, disposição e profissionalismo.

Aos meus colegas de mestrado Gustavo e Kairin, pelos momentos divididos juntos e, principalmente pela amizade que ficou e incentivo em momentos difíceis.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, por me oportunizar um aperfeiçoamento gratuito e de excelência.

E, a todos que direta ou indiretamente contribuíram e foram fundamentais nestes dois anos, até a conclusão desta pesquisa.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Representação esquemática de uma injetora. ....                                                                                                                 | 22 |
| Figura 2 – Representação esquemática de uma rosca de injeção, com as três respectivas zonas.....                                                                           | 24 |
| Figura 3 – Ciclo de injeção mostrando as diferentes etapas durante o processo. ....                                                                                        | 28 |
| Figura 4 – Perfil de pressão na cavidade e vazão ao longo do ciclo de injeção nas diferentes etapas da injeção.....                                                        | 29 |
| Figura 5 – Curva esquemática típica de polímeros fundidos de viscosidade vs taxa de cisalhamento. ....                                                                     | 34 |
| Figura 6 – Perfil de velocidade e taxa de cisalhamento para 3 fluidos com índice da lei das potências distintos.....                                                       | 36 |
| Figura 7 – Fluxo polimérico esquemático dentro da cavidade do molde, mostrando variação da morfologia ao longo da espessura do molde. ....                                 | 36 |
| Figura 8 – Modelo de Tadmor para fluxo do tipo fonte (fountainflow) entre duas paredes frias.....                                                                          | 37 |
| Figura 9 – Diferentes conformações das cadeias poliméricas. A)Cadeia polimérica no estado relaxado (enovelado) e b) cadeias orientadas ao longo do fluxo.....              | 38 |
| Figura 10 – Variação do grau de orientação ao longo da espessura da cavidade. ....                                                                                         | 39 |
| Figura 11 – Efeito esquemático do grau de orientação em diferentes propriedades mecânicas de peças injetadas. ....                                                         | 40 |
| Figura 12 – Efeito esquemático da taxa de preenchimento e da temperatura do fundido no grau de orientação.....                                                             | 42 |
| Figura 13 – Efeito esquemático da taxa de preenchimento e da temperatura do fundido no grau de orientação.....                                                             | 42 |
| Figura 14 – Efeito da pressão de compactação no grau de orientação da superfície e do núcleo da peça injetada.....                                                         | 43 |
| Figura 15 – Variação da Tensão de escoamento com a temperatura do molde para o Policarbonato (PC). ....                                                                    | 49 |
| Figura 16 – Efeito da pressão de compactação e da temperatura de injeção na pressão da cavidade para a) Poliestireno (PS) e b) Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). .... | 52 |
| Figura 17 – Efeito da pressão de compactação na pressão de cavidade para o Polipropileno (PP). ....                                                                        | 53 |
| Figura 18 – Curvas de tensão-deformação para diferentes velocidades de injeção. ....                                                                                       | 54 |
| Figura 19 – Módulo de elasticidade e resistência a tração para diferentes velocidades de injeção. ....                                                                     | 55 |
| Figura 20 – Representação esquemática da função-perda vs propriedade. ....                                                                                                 | 69 |
| Figura 21 – Estrutura química básica do ABS e seus monômeros constituintes.....                                                                                            | 79 |
| Figura 22 – Corpo de prova do Tipo I, segundo normas ASTM. ....                                                                                                            | 84 |
| Figura 23 – Corpo de prova de impacto, segundo norma ASTM D256. ....                                                                                                       | 85 |
| Figura 24 – Corpo de prova de tração utilizado. As linhas vermelhas representam as cadeias poliméricas.....                                                                | 88 |
| Figura 25 – Corpo de prova de impacto. As linhas vermelhas representam as cadeias poliméricas.....                                                                         | 88 |

|                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 26 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência sob Tração vs Pressão de compactação e Temperatura do molde. ....                                                                 | 123 |
| Figura 27 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência sob Tração vs Pressão de compactação e Temperatura do fundido. ....                                                               | 123 |
| Figura 28 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência sob Tração vs Temperatura do molde e Temperatura do fundido. ....                                                                 | 124 |
| Figura 29 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Pressão de compactação e Temperatura do fundido. ....                                                                  | 125 |
| Figura 30 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Pressão de compactação e Velocidade de Injeção. ....                                                                   | 126 |
| Figura 31 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Temperatura do fundido e Velocidade de injeção. ....                                                                   | 127 |
| Figura 32 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Pressão de compactação e Temperatura do fundido. ....                                                                  | 128 |
| Figura 33 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência ao Impacto (RI) vs Temperatura do fundido e Temperatura do molde. ....                                                            | 130 |
| Figura 34 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistência sob Tração (RT), obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de Resposta (projeções bidimensionais). ....                                                                         | 131 |
| Figura 35 – Influência dos parâmetros de injeção no Módulo Elástico (E), obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de resposta (projeções bidimensionais). ....                                                                                 | 132 |
| Figura 36 – Influência dos parâmetros de injeção na Força Máxima, obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de Resposta (projeções bidimensionais). ....                                                                                        | 133 |
| Figura 37 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistência ao Impacto (RI), obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de Resposta (projeções bidimensionais). ....                                                                         | 134 |
| Figura 38 – Regiões do corpo de prova de impacto. ....                                                                                                                                                                                                | 139 |
| Figura 39 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção A. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x.. .... | 141 |
| Figura 40 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção B. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x. ....  | 141 |
| Figura 41 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção C. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x. ....  | 142 |

|                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 42 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção D. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 270x.        | 142 |
| Figura 43 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção E. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 270x com BS; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x. | 143 |
| Figura 44 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção F. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x..        | 143 |
| Figura 45 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção G. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 70x; c) Região da Fratura, aumento de 500x; d) Região de Corte, aumento de 50x.       | 144 |
| Figura 46 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção H. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x..        | 144 |
| Figura 47 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção I. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região do Entalhe-Borda, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 100x.  | 145 |
| Figura 48 – Microscopia Eletrônica de Varredura do ABS, Condição de injeção A. Aumento de 10.000 x. Ataque com Sulfocrômica. A parte mais clara representa a matriz e as partes escuras os orifícios, referentes ao Polibutadieno.                      | 146 |
| Figura 49 – Análise de Imagem da amostra de ABS da condição A, a partir da imagem de MEV. As regiões em vermelho representam os domínios elastoméricos. Aumento de 10.000 x e ataque com sulfocrômica.                                                  | 146 |
| Figura 50 – Corpos de prova da condição I, sem alívio de tensões (superior) e com alívio de tensões (inferior).                                                                                                                                         | 152 |

## LISTA DE GRAFICOS

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 1 – Curva de impacto instrumentado Força vs Tempo para amostras das condições de injeção B e G.....                    | 94  |
| Gráfico 2 – Comparação das médias via Teste de Tukey para a propriedade de Resistência sob Tração (RT).....                    | 98  |
| Gráfico 3 – Valores da Resistência sob Tração (RT)média e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção. ....  | 98  |
| Gráfico 4 – Comparação das médias via Teste de Tukey para a propriedade Módulo Elástico (E).....                               | 100 |
| Gráfico 5 – Valores do Módulo Elástico médio e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção. ....             | 100 |
| Gráfico 6 – Comparação das médias via Teste de Tukey para o parâmetro Força Máxima.....                                        | 102 |
| Gráfico 7 – Valores da Força Máxima média e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção. ....                | 102 |
| Gráfico 8 – Comparação das médias via Teste de Tukey para a propriedade de Resistência ao Impacto. ....                        | 104 |
| Gráfico 9 – Valores de Resistência ao Impacto (RI) média e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção. .... | 104 |
| Gráfico 10 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistencia Máxima sob Tração (RT).....                                   | 108 |
| Gráfico 11 – Influência dos parâmetros de injeção no Módulo Elástico (E). ....                                                 | 109 |
| Gráfico 12 – Influência dos parâmetros de injeção na Força Máxima.....                                                         | 111 |
| Gráfico 13 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistencia ao Impacto (RI). ....                                         | 112 |
| Gráfico 14 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção na Resistência sob Tração (RT).....                                | 114 |
| Gráfico 15 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção no Módulo Elástico (E). ....                                       | 115 |
| Gráfico 16 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção na Força Máxima.....                                               | 116 |
| Gráfico 17 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção na Resistência ao Impacto (RI).....                                | 117 |
| Gráfico 18 – Perfil de variação da massa dos corpos de prova de tração, de acordo com os parâmetros de injeção. ....           | 119 |
| Gráfico 19 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição A, em escala logarítmica.....                                  | 148 |
| Gráfico 20 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição B, em escala logarítmica.....                                  | 148 |
| Gráfico 21 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição C, em escala logarítmica.....                                  | 149 |
| Gráfico 22 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição D, em escala logarítmica.....                                  | 149 |
| Gráfico 23 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição E, em escala logarítmica.....                                  | 149 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 24 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição F, em escala logarítmica..... | 149 |
| Gráfico 25 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição G, em escala logarítmica..... | 150 |
| Gráfico 26 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição H, em escala logarítmica..... | 150 |
| Gráfico 27 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição I, em escala logarítmica..... | 150 |
| Gráfico 28–Resistência sob Tração vs Tamanho Médio Ponderado do Polibutadieno (PB). ....      | 159 |
| Gráfico 29–Resistência ao Impacto (RI) vs tamanho médio do Polibutadieno (PB). ....           | 160 |
| Gráfico 30 – Tamanho médio ( $\mu\text{m}^2$ ) vs Parâmetros de injeção.....                  | 161 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Dimensões típicas de roscas de injeção para diferentes materiais, em centímetros.....                                                                                                           | 24  |
| Tabela 2 – Matriz Taguchi Ortogonal Preliminar. ....                                                                                                                                                       | 82  |
| Tabela 3 – Parâmetros de injeção e seus respectivos valores.....                                                                                                                                           | 82  |
| Tabela 4 – Perfil de temperatura da injetora, de acordo com a temperatura do fundido utilizada. ....                                                                                                       | 83  |
| Tabela 5 – Matriz de experimentos Taguchi. Cada condição representa um experimento realizado. ....                                                                                                         | 83  |
| Tabela 6 – Dimensões do corpo de prova de tração utilizado.....                                                                                                                                            | 85  |
| Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova de impacto. ....                                                                                                                                                    | 85  |
| Tabela 8 – Resistência sob Tração (RT) médias para diferentes condições de injeção do ABS HI 10. ....                                                                                                      | 90  |
| Tabela 9 – Propriedades de Resistência ao Impacto (RI) e Força Máxima médias, para diferentes condições de injeção do ABS HI 10. ....                                                                      | 92  |
| Tabela 10 – Parâmetros e propriedades médias obtidas no ensaio de impacto instrumentado, para as diferentes condições de injeção.....                                                                      | 93  |
| Tabela 11 – Índice de fragilidade (BI), para as diferentes condições de injeção.....                                                                                                                       | 95  |
| Tabela 12 – Variação da Resistência sob Tração (RT) do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.....                                                                                                 | 97  |
| Tabela 13 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Resistência sob Tração (RT). ....                                                                                                                   | 97  |
| Tabela 14 – Variação do Módulo Elástico (E) do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.....                                                                                                         | 99  |
| Tabela 15 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Módulo Elástico (E). ....                                                                                                                           | 99  |
| Tabela 16 – Variação da Força Máxima do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.....                                                                                                                | 101 |
| Tabela 17 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Força Máxima. ....                                                                                                                                  | 101 |
| Tabela 18 – Variação da Resistência ao Impacto (RI) do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.....                                                                                                 | 103 |
| Tabela 19 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Resistência ao Impacto (RI). ....                                                                                                                   | 103 |
| Tabela 20 – Resultados do cálculo da razão <i>Signal-to-noise</i> (S/N Ratio), usando a forma <i>Larger-the-better</i> , para as propriedades sob tração medidas, nas diferentes condições de injeção..... | 105 |
| Tabela 21 – Resultados do cálculo da razão <i>Signal-to-noise</i> (S/N Ratio), usando a forma <i>Larger-the-better</i> , para as propriedades sob tração medidas, nas diferentes condições de injeção..... | 106 |
| Tabela 22 – Resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a Resistência sob Tração (RT), combinado com o cálculo das razões S/N. ....                                                                    | 107 |
| Tabela 23 – Resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a Força Máxima, combinado com o cálculo das razões S/N. ....                                                                                   | 108 |
| Tabela 24 – Resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a Força Máxima, combinado com o cálculo das razões S/N. ....                                                                                   | 110 |
| Tabela 25 – Resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a Resistência ao Impacto (RI), combinado com o cálculo das razões S/N.....                                                                     | 111 |

|                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 26 – Condições otimas de injeção determinadas pela análise de Variância (ANAVA).....                                                                                                                                                            | 113 |
| Tabela 27 – Massa média dos corpos de prova de tração nas diferentes condições de injeção.....                                                                                                                                                         | 118 |
| Tabela 28 – ANAVA aplicado à variação de massa. ....                                                                                                                                                                                                   | 118 |
| Tabela 29 – Previsão de propriedades mecânicas em diferentes condições de injeção via Superfície de Resposta. ....                                                                                                                                     | 135 |
| Tabela 30 – Condições de injeção escolhidas para verificação da eficácia dos modelos.....                                                                                                                                                              | 136 |
| Tabela 31– Resultados das propriedades mecânicas das 4 condições de otimização. ....                                                                                                                                                                   | 137 |
| Tabela 32 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos da propriedade de Resistência sob Tração (RT), em MPa. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido. .... | 137 |
| Tabela 33 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos da propriedade Módulo Elástico (E), em MPa. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido.....             | 137 |
| Tabela 34 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos do parâmetro Força Máxima sob Impacto, em N. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido.....            | 137 |
| Tabela 35 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos da propriedade de Resistência ao Impacto (RI), em J/m. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido.....  | 138 |
| Tabela 36 – Resultados gerais da contagem de domínios elastoméricos do ABS HI 10, nas diferentes condições de injeção. ....                                                                                                                            | 147 |
| Tabela 37 – Propriedade de Resistência sob Tração (RT), em Mpa, com e sem alivio de tensões, nas diferentes condições de injeção. ....                                                                                                                 | 153 |
| Tabela 38 – Propriedade Módulo Elástico (E), em Mpa, com e sem alivio de tensões, nas diferentes condições de injeção. ....                                                                                                                            | 153 |
| Tabela 39 – Parâmetro Força Máxima sob Impacto, em N, com e sem alivio de tensões, nas diferentes condições de injeção. ....                                                                                                                           | 154 |
| Tabela 40–Propriedade de Resistência ao Impacto (RI), em J/m, com e sem alivio de tensões, nas diferentes condições de injeção. ....                                                                                                                   | 155 |
| Tabela 41 – Valores das condições de processamento, morfologia e propriedades mecânicas do ABS HI-10. ....                                                                                                                                             | 156 |
| Tabela 42 – Propriedades mecânicas das condições otimizadas. ....                                                                                                                                                                                      | 156 |
| Tabela 43 – Comparação entres condições F e T1.....                                                                                                                                                                                                    | 157 |
| Tabela 44 – Comparação entres condições I e T2.....                                                                                                                                                                                                    | 157 |
| Tabela 45 – Comparação entres condições G e S2.....                                                                                                                                                                                                    | 158 |
| Tabela 46 – Tamanho médio das partículas de PB e propriedades mecânicas medias obtidas nas diferentes condições de injeção. ....                                                                                                                       | 159 |
| Tabela 47 – Análise de Variância aplicada ao tamanho médio ponderado de PB... ..                                                                                                                                                                       | 160 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Equação 1 – Função-perda do Método Taguchi. ....                                                   | 69  |
| Equação 2 – Razão S/N <i>Smaller-the-better</i> . ....                                             | 70  |
| Equação 3 – Razão S/N <i>Larger-the-better</i> . ....                                              | 70  |
| Equação 4 – Razão S/N <i>Nominal-the-better</i> . ....                                             | 70  |
| Equação 5 – Cálculo da soma dos desvios quadráticos. ....                                          | 74  |
| Equação 6 – Cálculo da soma dos desvios quadráticos II. ....                                       | 75  |
| Equação 7 – Soma dos desvios quadráticos III. ....                                                 | 75  |
| Equação 8 – Cálculo da deformação. ....                                                            | 89  |
| Equação 9 – Determinação do Modulo Elástico ou de Young. ....                                      | 90  |
| Equação 10 – Índice de fragilidade (BI). ....                                                      | 95  |
| Equação 11 – Regressão linear para Resistência Máxima sob Tração (RT). ....                        | 120 |
| Equação 12 – Regressão linear para Módulo Elástico (E). ....                                       | 120 |
| Equação 13 – Regressão linear para Força Máxima. ....                                              | 120 |
| Equação 14 – Regressão linear para Resistência ao Impacto (RI). ....                               | 120 |
| Equação 15 – Equação de Superfície de Resposta para Resistência sob Tração (RT)<br>.....           | 122 |
| Equação 16 – Equação de Superfície de Resposta para Módulo Elástico (E) .....                      | 125 |
| Equação 17 – Equação de Superfície de Resposta para Força Máxima .....                             | 127 |
| Equação 18 – Equação de Superfície de Resposta para Resistência ao Impacto (RI).<br>.....          | 129 |
| Equação 19 – Cálculo da Diferença Percentual (DFP) .....                                           | 137 |
| Equação 20 – Cálculo do Índice de Dispersão de Borracha. ....                                      | 147 |
| Equação 21 – Cálculo da massa de Polibutadieno (PB) e Estireno-Acrinonitrila (SAN)<br>no ABS. .... | 147 |
| Equação 22 – Cálculo da porcentagem de massa de Polibutadieno (PB) no ABS. ....<br>.....           | 148 |

## LISTA DE SIGLAS

|                  |                                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------|
| ABS              | Copolímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno      |
| ANAVA            | Análise de Variância                                |
| ASTM             | <i>American Society of Techniques and Materials</i> |
| BS               | <i>BackScattering</i> - Elétrons Retroespalhados    |
| CI's             | Intervalos de Confiança                             |
| DOE              | <i>Design of Experiments</i>                        |
| DOF              | <i>Degree of Freedom</i>                            |
| E                | Módulo Elástico ou Módulo de Young                  |
| F <sub>max</sub> | Força Máxima                                        |
| GAIM             | Moldagem por Injeção Assistida por Gás              |
| HSD              | Diferença Honestamente Significativa                |
| IF               | Índice de Fluidez                                   |
| L/D              | Razão Comprimento/Diâmetro                          |
| LCP              | Polímero Líquido Cristalino                         |
| MEV              | Microscopia Eletrônica de Varredura                 |
| NBR              | Copolímero de Butadieno-Acrilonitrila               |
| PBT              | Polibutileno Tereftalato                            |
| PC               | Policarbonato                                       |
| PE               | Polietileno                                         |
| PEAD             | Polietileno de Alta Densidade                       |
| PEBD             | Polietileno de Baixa Densidade                      |
| PEBDL            | Polietileno de Baixa Densidade Linear               |
| PEEK             | Poli (Éter Éter Cetona)                             |
| PET              | Polietileno Tereftalato                             |
| PLA              | Poli (Ácido Lático)                                 |
| PP               | Polipropileno                                       |
| OS               | Poliestireno                                        |
| PTFE             | Poli (TetraFluorEtileno)                            |
| PVC              | Policloreto de Vinila                               |
| RI               | Resistência ao Impacto                              |
| RM               | Rotomoldagem                                        |
| RT               | Resistência sob Tração                              |
| S/N              | Razão <i>Signal-to-noise</i>                        |
| SAN              | Copolímero de Estireno-Acrilonitrila                |
| SBR              | Copolímero de Butadieno-Estireno                    |
| UHMWPE           | Polietileno de Ultra Alta Massa Molar               |
| WSD              | Diferença Totalmente Significativa                  |

## SUMÁRIO

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                            | 18 |
| 2 OBJETIVOS .....                                                             | 20 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA .....                                                 | 21 |
| 3.1 MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....                                                 | 21 |
| 3.2 EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO .....                                              | 22 |
| 3.2.1. Unidade de Injeção .....                                               | 23 |
| 3.2.1.1 Rosca de plastificação .....                                          | 23 |
| 3.2.1.2 Cilindro de plastificação .....                                       | 26 |
| 3.2.1.3 Bico de injeção .....                                                 | 26 |
| 3.2.2 Unidade de Fechamento .....                                             | 27 |
| 3.3 CICLO DE INJEÇÃO .....                                                    | 27 |
| 3.3.1 Etapa de preenchimento .....                                            | 30 |
| 3.3.2 Etapa de empacotamento ou compactação .....                             | 31 |
| 3.3.3 Etapa de resfriamento .....                                             | 32 |
| 3.4 MORFOLOGIA DE PEÇAS INJETADAS.....                                        | 33 |
| 3.4.1 Reologia dos polímeros fundidos .....                                   | 33 |
| 3.4.2 Orientação molecular .....                                              | 38 |
| 3.4.3 Influência dos parâmetros de injeção na orientação .....                | 41 |
| 3.4.3 Morfologia de polímeros cristalinos .....                               | 43 |
| 3.5 PARÂMETROS IMPORTANTES DO PROCESSO DE INJEÇÃO .....                       | 44 |
| 3.5.1 Temperatura do fundido .....                                            | 44 |
| 3.5.2 Temperatura do molde .....                                              | 47 |
| 3.5.3 Pressão de compactação .....                                            | 50 |
| 3.5.4 Velocidade de injeção .....                                             | 54 |
| 3.6 MÉTODO TAGUCHI .....                                                      | 56 |
| 3.6.1 Técnicas para otimização da moldagem por injeção.....                   | 56 |
| 3.6.2 Descrição geral do Método Taguchi.....                                  | 57 |
| 3.6.3 Método Taguchi aplicado para melhoria da qualidade do produto .....     | 61 |
| 3.6.3.1 Estabilidade dimensional.....                                         | 61 |
| 3.6.3.2 Aparência ou valor estético .....                                     | 65 |
| 3.6.4 Método Taguchi aplicado na melhoria das propriedades dos materiais .... | 66 |
| 3.6.4.1 Propriedades mecânicas .....                                          | 66 |

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.7 FERRAMENTAS DO MÉTODO TAGUCHI.....                                         | 68        |
| 3.7.1 Função-perda.....                                                        | 68        |
| 3.7.2 Razão <i>Signal-to-noise</i> (S/N).....                                  | 69        |
| 3.7.3 Planejamento de Experimentos ( <i>Design of Experiments</i> - DOE) ..... | 71        |
| 3.7.4 Análise de Variância (ANAVA) .....                                       | 74        |
| 3.8 PROCEDIMENTOS PARA OTIMIZAÇÃO DE PARAMETROS .....                          | 75        |
| 3.9 ACRILONITRILA – BUTADIENO – ESTIRENO (ABS) .....                           | 78        |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                     | 81        |
| 4.1 MATERIAIS .....                                                            | 81        |
| 4.2 MÉTODOS.....                                                               | 81        |
| 4.2.1 Injeção dos Corpos de Prova .....                                        | 81        |
| 4.2.2 Planejamento dos experimentos .....                                      | 82        |
| 4.2.3 Ensaio de Tração .....                                                   | 84        |
| 4.2.4 Ensaio de Impacto Instrumentado.....                                     | 85        |
| 4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                          | 86        |
| 4.2.6 Alívio de tensões .....                                                  | 87        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                          | <b>88</b> |
| 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....                                               | 88        |
| 5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO .....                                                     | 89        |
| 5.3 ENSAIO DE IMPACTO INSTRUMENTADO .....                                      | 91        |
| 5.4 TESTE DE TUKEY .....                                                       | 96        |
| 5.4.1 Teste de Tukey: Resistência Máxima sob Tração.....                       | 97        |
| 5.4.2 Teste de Tukey: Módulo Elástico E .....                                  | 99        |
| 5.4.3 Teste de Tukey: Força Máxima .....                                       | 101       |
| 5.4.4 Teste de Tukey: Resistência ao Impacto (RI) .....                        | 103       |
| 5.5 ANÁLISE DA RAZÃO <i>SIGNAL-TO-NOISE</i> (S/N RATIO).....                   | 104       |
| 5.6 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANAVA) .....                                         | 106       |
| 5.6.1 Análise de Variância (ANAVA): Resistência sob Tração (RT).....           | 107       |
| 5.6.2 Análise de Variância (ANAVA): Módulo Elástico (E) .....                  | 108       |
| 5.6.3 Análise de Variância (ANAVA): Força Máxima .....                         | 110       |
| 5.6.4 Análise de Variância (ANAVA): Resistência ao Impacto (RI) .....          | 111       |
| 5.6.5 Otimização dos parâmetros .....                                          | 112       |
| 5.6.6 Análise de Variância (ANAVA): Interação entre Parâmetros.....            | 113       |
| 5.7 ANÁLISE DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA .....                                 | 118       |
| 5.8 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR .....                                          | 119       |

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.9 SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....                                                   | 121        |
| 5.9.1 Superfície de Resposta: Resistência sob Tração (RT).....                    | 121        |
| 5.9.2 Superfície de Resposta: Modulo Elástico (E) .....                           | 124        |
| 5.9.3 Superfície de Resposta: Força Máxima .....                                  | 127        |
| 5.9.4 Superfície de Resposta: Resistência ao Impacto .....                        | 128        |
| 5.9.5 Superfície de Resposta: Interação entre parâmetros .....                    | 130        |
| 5.9.6 Otimização de múltiplas respostas simultâneas.....                          | 135        |
| 5.10 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....                                               | 136        |
| 5.11 ESTUDO MORFOLÓGICO.....                                                      | 139        |
| 5.11.1 Morfologia dos corpos de prova fraturados por impacto .....                | 139        |
| 5.11.2 Medição dos domínios elastoméricos .....                                   | 145        |
| 5.12 TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES .....                                | 151        |
| 5.12.1 Efeito na Resistência sob Tração.....                                      | 152        |
| 5.12.2 Efeito no Módulo Elástico.....                                             | 153        |
| 5.12.3 Efeito na Força Máxima sob Impacto .....                                   | 154        |
| 5.12.4 Efeito na Resistência ao Impacto .....                                     | 155        |
| 5.13 RELAÇÃO ENTRE PROCESSAMENTO, MORFOLOGIA E PROPRIEDADES .....                 | 156        |
| 5.13.1 Condições otimizadas .....                                                 | 157        |
| 5.13.2 Relação entre distribuição de Polibutadieno e propriedades mecânicas ..... | 158        |
| 5.13.3 Relação entre parâmetros de injeção e tamanho médio dos domínios.....      | 160        |
| <b>6 CONCLUSÃO .....</b>                                                          | <b>162</b> |
| <b>SUGESTÕES DE TRABALHOS.....</b>                                                | <b>165</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                           | <b>166</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                               | <b>184</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A moldagem por injeção é um dos processos mais utilizados na indústria, sendo um processo de produção em larga escala. Através deste processo, podem ser produzidas peças e componentes de diferentes formas e tamanhos. Mas a qualidade, assim como as propriedades dos produtos produzidos por esse método estão intimamente relacionadas como as condições de injeção, isto é, dos parâmetros de injeção, tais como temperatura do fundido, temperatura do molde, pressão de injeção, etc [1].

A fim de assegurar a qualidade do produto, deve – se definir quais são os melhores valores das variáveis a serem aplicados, com a finalidade de definir a melhor relação custo-benefício do processo. Para implementar essa avaliação e otimização do processo de moldagem por injeção, pode-se empregar a metodologia Taguchi Ortogonal. [2] Segundo Taguchi, a qualidade é medida pelo desvio que uma característica funcional apresenta, em relação ao valor que é esperado da mesma.

Os fatores denominados "Ruído" (temperatura, umidade, poeira, deterioração, etc), causam tais desvios e resultam em perda de qualidade do produto. Este "prejuízo" pode ser avaliado através de uma "função perda" que foi inicialmente proposta por Taguchi. A proposta do método Taguchi é a de determinar a função perda do produto e otimizá-la, empregando técnicas estatísticas. Essas análises permitem identificar os parâmetros ótimos de projeto que minimizam ou mesmo eliminam as influências dos fatores ruído no desempenho do produto. Outra técnica aplicada para otimização é a Superfície de Resposta, a partir da qual é possível se relacionar uma variável de resposta com dois fatores de entrada, obtendo-se assim o comportamento daquela característica.

A otimização do processo de injeção pode acarretar em mudanças nas propriedades e/ou estrutura, geralmente aumentando o desempenho do produto, assim como pode facilitar o processamento do material. Este trabalho tem como proposta avaliar a influência dos parâmetros do processo de moldagem por injeção na qualidade do produto final, assim como fazer um estudo a respeito da otimização dos mesmos, visando a melhoria da eficiência

do processo para a resina ABS, um polímero amorfo com sua excelente resistência ao impacto e sua ótima relação de custo-benefício. Para realizar esse trabalho, foram utilizadas as metodologias de Taguchi e da Superfície de Resposta e do Teste de Tukey, como ferramentas de análise comparativa, relacionando as condições de processamento, propriedades e morfologia.

## 2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar a influência dos diferentes parâmetros de injeção no comportamento da Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS).

Como objetivos específicos têm-se:

- a) Analisar a influência das variáveis do processo de injeção (temperatura do fundido, velocidade de injeção, pressão de compactação e temperatura do molde) no comportamento mecânico sob tração e sob impacto da resina de ABS;
- b) Analisar a influência das variáveis de injeção na morfologia de peças injetadas de ABS;
- c) Comparar os métodos de otimização de Taguchi Ortogonal e Superfície de Resposta;
- d) Avaliar a influência e eficiência do tratamento térmico de alívio de tensões nas propriedades mecânicas do ABS.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 MOLDAGEM POR INJEÇÃO

Em 1872, foi patenteado o que seria o esboço preliminar do processo de moldagem por injeção, o qual foi idealizado pelos irmãos Hyatt [1]. Alguns anos depois, em 1878, John Wesley Hyatt criou um dos primeiros equipamentos para injeção. O equipamento era formado por um cilindro de aquecimento com câmaras aquecida a vapor, um bico para descarregar o material de um êmbolo acionado hidráulicamente para pressionar o material fundido. Ao lado do equipamento constava uma prensa hidráulica onde era despejado o material fundido com o molde fechado. O molde fechado era necessário, devido à instabilidade do material de trabalho, que era, no caso, o nitrato de celulose, este desenvolvido pelo próprio Hyatt.

Após a invenção de Hyatt as máquinas foram aperfeiçoando-se até as injetoras dos dias atuais, em que os fabricantes buscam diversificá-las visando o desenvolvimento de equipamentos que operem com a máxima redução de custos, especialmente energéticos, oferecendo grande produção e uniformidade das peças injetadas.

O processo de moldagem por injeção envolve o preenchimento rápido, sob pressão, de uma cavidade de um molde com polímero fundido, seguido da solidificação do produto [3]. A moldagem por injeção é um processo repetitivo, no qual polímero fundido é forçado em uma ou mais cavidades, mantido sobre pressão até a remoção da peça em estado sólido.

Para chegar às cavidades, o polímero fundido (plastificado) percorre uma série de canais. O ciclo de injeção pode ser dividido em três operações básicas: aquecimento do polímero para que o mesmo possa fluir, solidificação do fundido dentro do molde e abertura do molde para ejeção da peça acabada ou semi-acabada. [4]

Uma característica importante da moldagem por injeção é que é um processo cíclico, podendo produzir várias peças de diferentes formatos simultaneamente, com boa repetibilidade e qualidade. [5] O processo de moldagem por injeção é um processo complexo, com diversas variáveis que

influenciam as propriedades das peças injetadas [6], ao mesmo tempo em quemantêm uma boa produtividade (baixo tempo de ciclo).

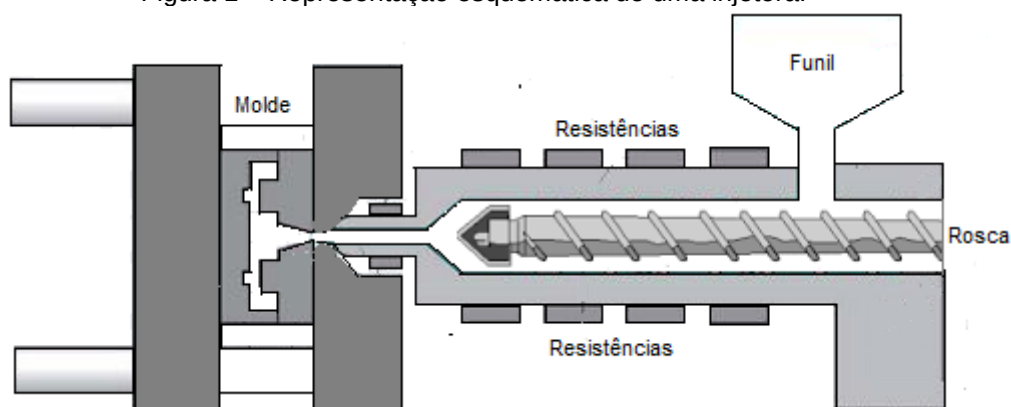
A moldagem por injeção pode ser utilizada para produzir componentes de elastômeros e termofixos, embora seja mais comumente utilizada para produzir peças de polímeros termoplásticos. Peças injetadas são comumente utilizadas em microeletrônica, pré-formas de garrafas, telefones, carcaças de computadores, para-choques automotivos, barcos etc, produzindo peças dos mais diversos formatos e tamanhos. [7]

Nos próximos tópicos, será detalhado o processo de moldagem por injeção com um todo, mostrando o equipamento, o ciclo de injeção e alguns parâmetros importantes, e seus respectivos efeitos nas propriedades das peças moldadas.

### 3.2 EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO

A máquina de moldagem por injeção possui alguns componentes básicos, podendo ser dividida em unidade de injeção e unidade de fechamento. Um exemplo esquemático de uma injetora é demonstrado na figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática de uma injetora.



Fonte: O autor.

A unidade de injeção também é denominada como unidade plastificadora, onde através de cisalhamento, atrito e calor plastifica e homogeneíza o material termoplástico. E, através da unidade de injeção ocorre à transferência deste material para o interior do molde, que fica alojado entre as placas fixa e móvel da máquina na unidade de fechamento. A unidade de

fechamento garante o travamento do molde no momento da injeção e também faz a abertura do molde após a solidificação da peça para ser extraída [8-9].

As máquinas injetoras podem ser hidráulicas, elétricas ou híbridas, ter fechamento do molde na horizontal ou na vertical, podendo ser hidráulico, hidráulico-mecânico ou elétrico-mecânico, ter pistão ou rosca para efetuar a injeção do material plastificado e ter de um a vários cilindros de injeção, sendo estas conhecidas como máquinas especiais bi-componentes ou multicomponentes.

### 3.2.1. Unidade de Injeção

A unidade de injeção é composta pelo funil de alimentação; pela rosca de plastificação, a qual é uma rosca recíproca, que é acionada por sistemas mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos, responsável por fundir o polímero; pelo cilindro de plastificação, também conhecido como canhão, que contém em seu interior a rosca recíproca citada anteriormente; pelo bico de injeção e pelas mantas elétricas, que fazem o aquecimento do canhão e, em conjunto com o cisalhamento provocado pela rosca, promove a fusão do polímero [10].

#### 3.2.1.1 Rosca de plastificação

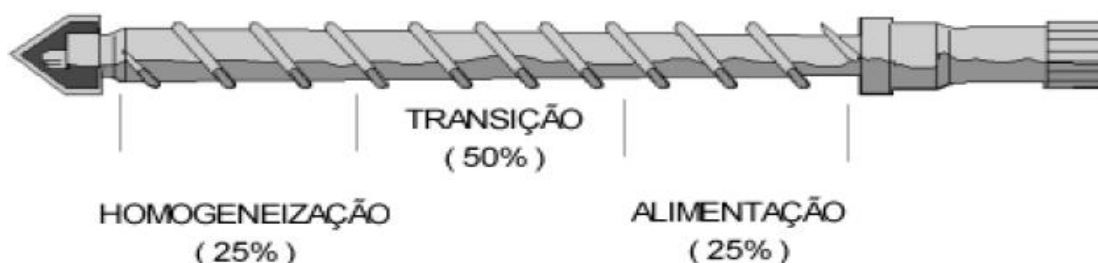
A rosca se encontra dentro do cilindro de plastificação e serve para transportar, comprimir, fundir, homogeneizar e dosar o material. A rosca basicamente consiste de três zonas: zona de alimentação; zona de compressão e zona de dosagem ou mistura. [10].

A geometria da rosca de plastificação, quantidade de filetes para cada zona, relação de compressão (ou taxa de compressão) e relação  $L/D$ , dependerão da característica de fusão do material termoplástico a ser processado [10].

A razão *Length/Diameter* ( $L/D$ ) é uma característica de grande importância no processo de injeção, pois afeta a homogeneização do material assim como a taxa de cisalhamento que o polímero sofre ao longo da rosca. A

razão L/D costuma ser entre 16:1 e 30:1 para a maioria das roscas de injeção. Um exemplo esquemático de uma rosca de injeção é demonstrado na figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática de uma rosca de injeção, com as três respectivas zonas.



Fonte: O autor.

O tamanho (comprimento) das zonas, assim como a razão L/D das diferentes zonas da rosca, pode também apresentar variação, conforme o material a ser injetado.

Por exemplo, roscas de injeção para o Policloreto de Vinila (PVC) não apresentam a zona de dosagem ou a mesma é bastante pequena em relação às outras, devido ao fato de que o PVC sofre degradação com altas taxas de cisalhamento, liberando ácido clorídrico, que por sua vez deteriora a injetora. Por outro lado, roscas de injeção para o PET (Politereftalato de Etileno) necessitam de uma relação L/D maior e cisalhamento menor para garantir as propriedades do material e maior durabilidade.

Como foi ressaltado, alguns materiais necessitam roscas “especiais”, para que as propriedades/características dos produtos injetados não sejam muito prejudicadas. Na tabela 1 são demonstradas algumas dimensões de roscas de injeção, comumente utilizadas em alguns polímeros.

Tabela 1 – Dimensões típicas de roscas de injeção para diferentes materiais, em centímetros.

| Polímero | Diâmetro | Comprimento total | Zona de alimentação | Zona de transição | Zona de dosagem | VA   | VD   |
|----------|----------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------|------|------|
| PVC      | 11,4     | 228,6             | 34,3                | 194,3             | 0               | 1,52 | 0,51 |
| PSAI     | 11,4     | 228,6             | 68,6                | 45,7              | 114,3           | 1,52 | 0,36 |
| PEBD     | 11,4     | 228,6             | 57,2                | 114,3             | 57,2            | 1,52 | 0,32 |
| PEAD     | 11,4     | 228,6             | 91,4                | 45,7              | 91,4            | 1,65 | 0,39 |
| PA       | 11,4     | 228,6             | 171,5               | 11,4              | 45,7            | 1,65 | 0,32 |

Nota: VA – vão livre na zona de alimentação e VD – vão livre na zona de dosagem.

Fonte: Adaptado de [Rosato,2001].

As três zonas costumam apresentar diâmetros e comprimentos diferentes entre si, e, portanto, há diferenças nas suas razões  $L/D$ ; o diâmetro é menor na zona de alimentação e vai aumentando conforme avança para a zona de dosagem, fazendo com que o material sofra taxas de cisalhamentos diferentes.

Isso ocorre porque o diâmetro do cilindro de plastificação (ou barril) possui um diâmetro constante. Conforme o diâmetro da rosca aumenta, o vão livre por onde o material irá passar diminui, e, conseqüentemente, o material sofre maior cisalhamento.

Há três diferentes zonas numa rosca de injeção, cada uma com suas respectivas funções.

**a) Zona de alimentação:** geralmente é curta, tendo por finalidade transportar os grânulos sólidos do polímero para a próxima região. Conforme o polímero avança pela rosca, vai aumentando a sua viscosidade, devido ao pré-amolecimento do material, devido ao atrito com a rosca e com a parede do canhão [10].

**b) Zona de transição ou de compressão:** nesse estágio, ocorre um aumento na velocidade de transição do polímero em estado sólido para o estado fundido. O material pode até mesmo passar por toda a rosca e não estar completamente fundido (a fusão finaliza enquanto o material espera para ser injetado) [10]. “A função dessa zona é comprimir e fundir o material, continuar o bombeamento e, principalmente, homogeneizar e fundir o material” (MANRICH, 2005. p. 282). O comprimento dessa zona é de grande importância, pois se for muito pequeno, pode gerar degradação do polímero e se for muito grande, reduz a taxa de fusão da zona de alimentação [10].

A taxa de fusão da rosca determina o grau de plastificação do polímero, que por sua vez, depende da troca de calor por condução e por atrito do material com o equipamento e da razão de compressão desse estágio da rosca [10].

**c) Zona de dosagem ou de controle de vazão:** esse estágio da rosca tem por função estabilizar o fluxo e gerar contra-pressão (pressão contrária ao retorno da rosca) durante a dosagem, a fim de garantir a plastificação. Nessa zona também é efetivada a mistura e homogeneizada a temperatura do polímero. Devido ao alto atrito nessa zona, ocorre um alto grau de cisalhamento no material.

Na parte da frente da rosca de plastificação fica uma ponteira, fixada através de rosqueamento. Essa ponteira possui um anel de bloqueio que funciona como uma válvula que no momento da etapa de dosagem se abre, permitindo a passagem do material fundido para frente do cilindro e no momento da etapa de injeção se fecha, impedindo que o material plastificado retorne para o cilindro de plastificação forçando-o para dentro do molde.

#### 3.3.1.2 Cilindro de plastificação

O cilindro é a parte do equipamento onde a rosca de plastificação fica alojada. Dentro deste ocorre a fusão do material termoplástico, promovida pelo calor proveniente das resistências elétricas acopladas em seu exterior e também pelo atrito entre os grânulos do material.

Deve-se prestar muita atenção ao tempo em que o material termoplástico fundido permanece interior do cilindro, pois pode ocorrer uma degradação devido à exposição prolongada à pressão e ao calor [10].

#### 3.2.1.3 Bico de injeção

Possui o corpo confeccionado em aço especial e resistente ao calor, fixado junto ao cilindro de plastificação. Tem como funções principais a passagem do material plástico e o aumento da velocidade de saída do interior do cilindro de plastificação para as cavidades do molde.

O tipo de ponta esférica é o mais usual, pela vantagem de permitir uma menor área de contato com o molde, impedindo dessa forma, que ocorra a solidificação do material na saída do bico ou o aquecimento do molde. Mas devido ao alto cisalhamento, pode provocar a degradação do material [10].

### 3.2.2 Unidade de Fechamento

Essa parte da injetora basicamente contém o molde, com o formato final da peça, e todo o sistema que promove abertura e fechamento do molde, assim como, o sistema de ejeção da peça.

O molde é umas partes mais complexas para se projetar, existindo vários modelos e tamanhos. O seu projeto depende da peça final a ser produzida e da capacidade da injetora. Há os moldes convencionais, como os de duas e três placas e os moldes de canais quentes. No caso dos moldes de duas placas, uma das placas é fixa e a outra é móvel, sendo essa última responsável pela ejeção da peça. Por sua vez, no molde de três placas, há uma placa intermediária, que contém os canais de alimentação, que promove a remoção automática dos canais de alimentação da peça injetada [10].

O molde de canais quentes apresenta uma especificidade única: seus canais são aquecidos. Ao contrário dos moldes convencionais, onde os canais de alimentação se solidificam junto com a peça, no molde de canal aquecido, o polímero dentro do canal de alimentação permanece fundido, o que contribui na obtenção de peças de maior qualidade [10].

## 3.3 CICLO DE INJEÇÃO

De acordo com Manrich (2005, pg. 279), a injeção não é um processo contínuo, mas sim intermitente, seguindo um ciclo denominado como “*ciclo de injeção*”.

O ciclo de moldagem é o intervalo total entre o instante em que a matriz é fechada durante um ciclo e o instante correspondente ao fechamento do molde no ciclo seguinte, enquanto a máquina opera de forma repetitiva. O ciclo de máquina inicia-se quando ocorre o fechamento da porta de segurança que ativa o mecanismo de fechamento do molde. As operações subsequentes de fechamento de molde, injeção, esfriamento e abertura de molde transcorrem automaticamente. O ciclo de máquina termina quando o molde fechado se abre após o resfriamento programado da peça.

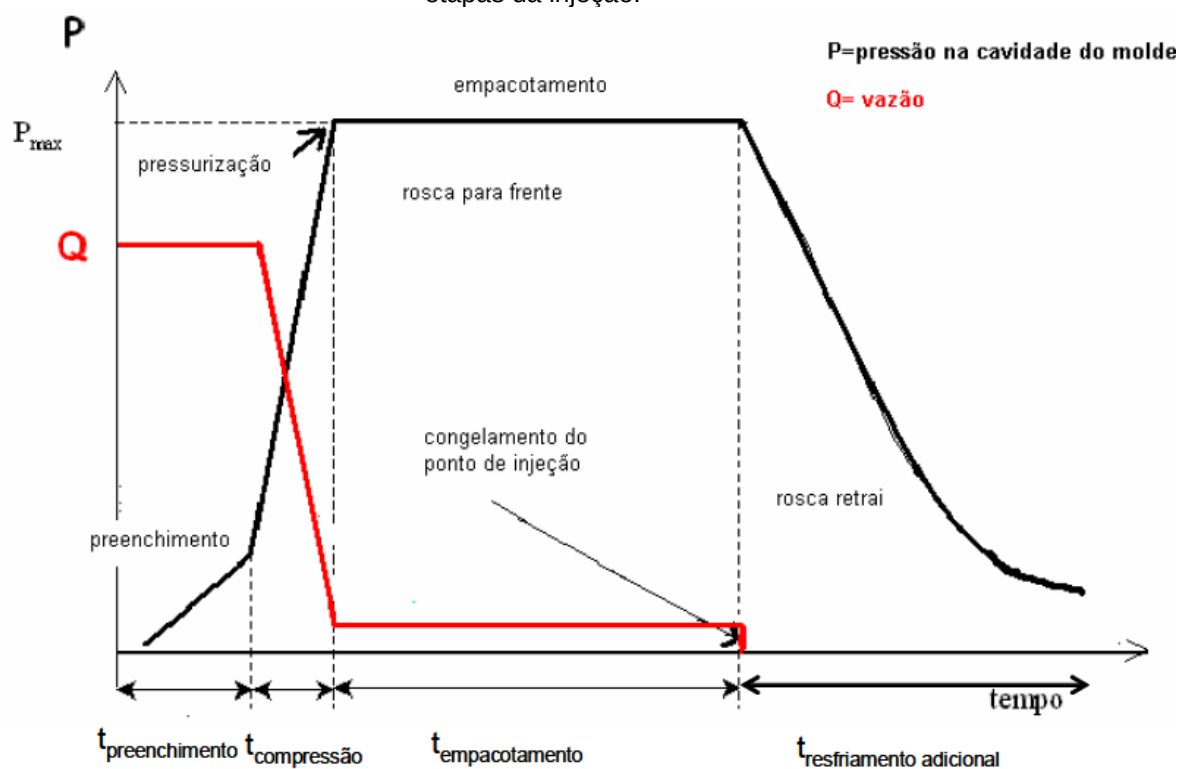


possa ser reparada, o processo de recuperação afeta os custos de produção da peça [10]. Além disso, ciclos muito curtos impõem uma carga excessiva ao sistema hidráulico da máquina, podendo resultar em tempo de paradas ou de manutenção.

A otimização do ciclo de injeção é bastante pesquisada, visto que reduz o custo unitário da peça. No caso de peças médias e grandes, o tempo do ciclo de resfriamento pode ser dominante em relação ao ciclo completo de injeção (podendo chegar a ser mais de 60 % do tempo do total do ciclo) [10]. Pode-se também otimizar outros parâmetros, tais como tempos mortos, como o tempo de abertura e fechamento do molde, tempo de travamento do molde e o tempo do recalque (que consiste na aplicação de pressão extra na cavidade, a fim de minimizar contração e aparecimento de rechupes).

Durante as diferentes etapas do ciclo de injeção, há variação da pressão na cavidade e da vazão de material ao longo do ciclo, como apresentado pela figura 4 [11].

Figura 4 – Perfil de pressão na cavidade e vazão ao longo do ciclo de injeção nas diferentes etapas da injeção.



Fonte: [LOTTI,2004].

Durante a fase de preenchimento, a pressão na cavidade aumenta vagarosamente com a entrada do polímero fundido, sendo que o mesmo começa a se resfriar assim que entra em contato com as paredes do molde.

Após a etapa de preenchimento, ainda há injeção de material fundido em menor quantidade, a fim de se compensar a contração volumétrica do polímero durante a solidificação. Nesse ponto a pressão atinge seu ponto de maior valor devido à compressão do polímero, dando início à etapa de empacotamento ou compactação.

Na etapa de compactação, o polímero é mantido sob pressão constante (pressão de compactação) enquanto simultaneamente sofre resfriamento, até o congelamento do ponto de injeção. Durante o resfriamento, ocorre uma queda contínua da pressão na cavidade. Ao mesmo tempo ocorre o retrocesso da rosca, a fim de preparar material para o próximo ciclo de injeção.

Portanto, podem-se distinguir três etapas durante o ciclo de injeção: etapa de preenchimento, de compactação e de resfriamento, que serão discutidas nos itens seguintes.

### 3.3.1 Etapa de preenchimento

Essa fase do processo de injeção compreende todo o período entre o início de preenchimento do molde até o início da compactação do polímero. O tempo da etapa de preenchimento é controlado pela velocidade de injeção, que, como será visto mais a frente, afeta a morfologia e as propriedades dos produtos injetados. Durante simulações e para facilitar o entendimento, pode-se considerar que o fluxo durante essa etapa é transiente (suas características se mantem as mesmas ao longo do tempo) e o polímero fundido é considerado um fluido pseudoplástico (não newtoniano), sendo um fluxo sob pressão [12-14].

Durante o preenchimento da cavidade, o fundido apresenta um fluxo característico, que depende de vários fatores, tais como do tipo de ponto de injeção (geometria, posição e quantidade), da geometria da peça (presença de obstáculos e mudança de espessura) e das condições de processo (temperaturas e velocidade de injeção) [11]. Todos esses fatores afetam a

orientação molecular induzida pelo fluxo de material, assim como a transferência de calor.

Após deixar os canais de alimentação, o polímero fundido entra na cavidade do molde, sofrendo resfriamento rápido (congelamento) nas paredes do molde, enquanto no centro continua ocorrendo o fluxo de material.

As taxas mais altas de cisalhamento ocorrem nas vizinhanças das camadas congeladas. Devido à constrição causada por esta camada, a velocidade do fluxo nesta área é consideravelmente maior que na frente de fluxo gerando um fluxo do tipo fonte (*fountainflow*) [11], discutido mais à frente no tópico 3.4.1.

O tempo de preenchimento é o tempo necessário para preencher o molde, sendo uma medida da velocidade de injeção: maiores velocidades de injeção promovem menores tempos de preenchimento. Em tempos curtos (alta velocidade de injeção), há pouco tempo para ocorrer a transferência de calor, as taxas de cisalhamento são elevadas (assim como a orientação molecular), e o aquecimento viscoso pode elevar a temperatura do fundido.

Em menores velocidades de injeção (aumento do tempo de preenchimento) ocorre uma maior transferência de calor, devido ao preenchimento mais lento do molde, promovendo um aumento da viscosidade e da pressão de injeção. Se a velocidade for demasiadamente baixa, o polímero pode sofrer solidificação antes de preencher completamente a cavidade do molde, gerando peças incompletas [15].

### 3.3.2 Etapa de empacotamento ou compactação

Essa é a segunda etapa ou fase do ciclo de injeção, consistindo em adicionar polímero fundido à cavidade do molde já preenchida, no intuito de compensar a contração (redução do volume) do polímero, devido à sua solidificação. Nessa etapa o fluxo polimérico deixa de ser controlado pela vazão, para ser regido pela pressão [12,13].

Esse fluxo, mesmo em baixas velocidades, é responsável pela distribuição de tensões de cisalhamento, principalmente próximo à interface

solido/fundido, devido à maior viscosidade do polímero. Se o tempo de compactação for curto demais, o fluxo pode retornar para o canal de alimentação, provocando orientação adicional, variações dimensionais e no peso do moldado [11].

Se a pressão de compactação for aplicada por tempo mais longo que o tempo de congelamento do canal de injeção, não ocorre efeitos no moldado, mas pode promover um aumento no tempo de ciclo de injeção.

Conforme aumenta-se a pressão de compactação, há um deslocamento da temperatura de cristalização (aumento de 20-30°C). A pressão de compactação também afeta a distribuição de orientação ao longo da espessura da peça, devido à redução do tempo de relaxação de orientação [16].

As pressões de compactação juntamente com o efeito fonte afetam as tensões residuais. Se a peça moldada é submetida a altas pressões de compactação e as tensões residuais não são removidas por ação da temperatura, ao deixar o molde, a peça apresenta tensões de tração na superfície e de compressão no centro. [11]

A temperatura do molde afeta a etapa de compactação. Em altas temperaturas do molde o resfriamento é mais lento, o que resulta em maiores pressões e aumento no tempo de congelamento do ponto de injeção. Características referentes à qualidade da peça injetada (densidade, encolhimento, tensões residuais) são determinadas durante a etapa de compactação [11].

### 3.3.3 Etapa de resfriamento

Essa é a última etapa do ciclo de injeção, tendo início logo após a injeção do material. O polímero fundido solidifica-se assim que entra em contato com as paredes frias do molde, formando uma camada congelada. Essa camada age como isolante térmico devido à baixa condutividade térmica do polímero, fazendo com que o núcleo se resfrie mais lentamente.

O encolhimento e o empenamento da peça moldada são impedidos ou reduzidos devido às paredes do molde, entretanto essa deformação “impedida”

dá origem à tensões residuais. As tensões residuais também podem ser causadas pela diferença de taxas de resfriamento na peça injetada durante o resfriamento, sendo que essas tensões residuais afetam a estabilidade dimensional, resistência mecânica e química [11].

Juntamente com tempo de injeção, temperatura e tempo de compactação, o tempo de resfriamento apresenta grande influência nas propriedades finais do moldado.

A temperatura do molde apresenta maior efeito na geração de tensões residuais que a temperatura do fundido, pois o gradiente de temperatura entre as camadas do material (ao longo da espessura) promove um impedimento da contração das camadas. Quanto menor a temperatura do molde, maior é o gradiente de temperatura [11].

### 3.4 MORFOLOGIA DE PEÇAS INJETADAS

A orientação das cadeias poliméricas apresenta grande influência nas propriedades e na morfologia dos polímeros, tanto em polímeros semicristalinos quanto em polímeros amorfos. Portanto, deve-se entender como ocorre o fluxo polimérico dentro dos canais de alimentação e dentro das cavidades do molde, para se traçar a relação entre as condições de processamento e as propriedades, principalmente mecânicas, do produto injetado [17]. Essa relação pode ser obtida de várias maneiras, incluindo simulação computacional.

Alguns conceitos básicos a respeito da reologia de polímeros fundidos serão discutidos e avaliados no tópico a seguir.

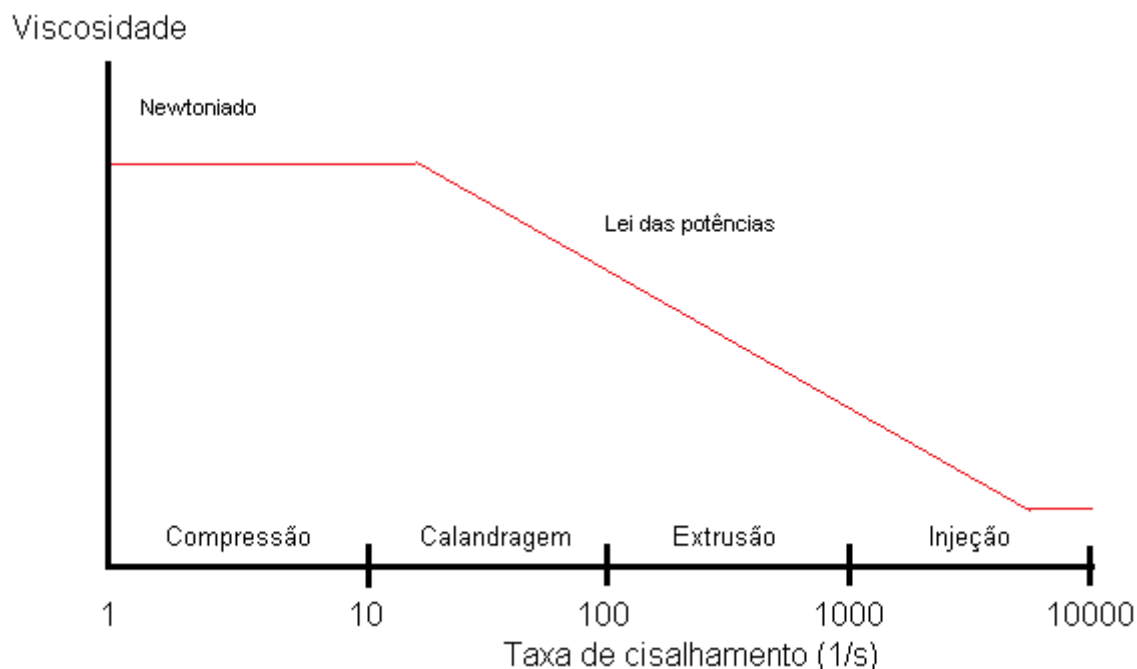
#### 3.4.1 Reologia dos polímeros fundidos

Polímeros, devido à sua elevada massa molar, apresentam um comportamento viscoelástico. A viscoelasticidade se refere ao fenômeno em que “o polímero apresenta características de um fluido viscoso e um sólido elástico ao mesmo tempo” (CANEVAROLO, 2013, p. 191) [18].

No caso da moldagem por injeção, por ser uma técnica de processamento que utiliza o polímero no estado fundido, é importante ressaltar

que as características viscosas são predominantes. [7] No caso de fluidos, há dois tipos básicos: os fluidos newtonianos e os não-newtonianos (ou fluido da Lei das Potências). Fluidos newtonianos apresentam uma viscosidade constante, enquanto fluidos da lei das potências apresentam uma viscosidade que varia com a taxa de cisalhamento. Uma curva típica de viscosidade vs taxa de cisalhamento de um polímero fundido é apresentada na figura 5.

Figura 5 – Curva esquemática típica de polímeros fundidos de viscosidade vs taxa de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de [Rosário,2005].

A viscosidade na região da Lei das Potências é definida pela relação:

$$\eta = m \times \dot{\gamma}^{n-1}, \text{ onde:}$$

$\eta$  = viscosidade;

$\dot{\gamma}$  = taxa de cisalhamento;

$m$  = consistência;

$n$  = índice da lei das potências.

Os fluidos não-newtonianos podem ser dilatantes ou pseudoplásticos. Fluidos dilatantes apresentam o valor de “n” maior que 1, isto é, sua viscosidade aumenta com a taxa de cisalhamento aplicada, sendo o caso de

que algumas soluções e emulsões de PVC e em alguns polímeros com carga [7].

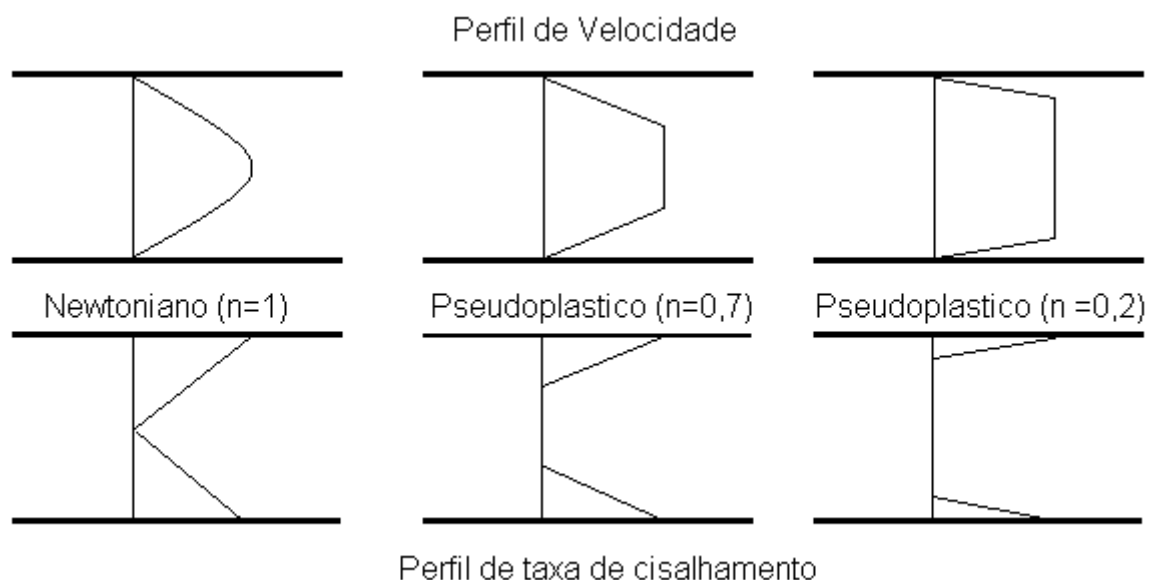
Para a maioria dos polímeros fundidos, o comportamento pseudoplástico é o mais comum ( $n < 1$ ) e, portanto, sua viscosidade diminui com a taxa de cisalhamento aplicada, o que torna o processamento facilitado com a aplicação de forças cisalhantes, como o ocorrido nos processos de extrusão e injeção.

A pseudoplasticidade apresentada por polímeros fundidos é uma consequência da orientação das cadeias poliméricas devido a taxa de cisalhamento aplicada. A característica da pseudoplasticidade também afeta o fluxo polimérico dentro do molde, tanto nos canais de alimentação quanto nas cavidades do molde. No caso específico da moldagem por injeção, o fluxo ocorre devido ao gradiente de pressão dentro do molde.

Entender o perfil de velocidade é de grande importância para se avaliar a taxa de cisalhamento, que por sua vez é responsável pela orientação molecular. No caso dos fluidos newtonianos com fluxo por pressão, o perfil de velocidade é parabólico, e a taxa de cisalhamento é máxima nas paredes da cavidade/canais, como demonstrado na figura abaixo.

Como dito anteriormente, polímeros fundidos geralmente apresentam um comportamento pseudoplástico, que tem influência direta no perfil de velocidade e de taxa de cisalhamento, como demonstrado na figura 7. Na região central do fluxo, apresenta-se um patamar onde a velocidade é máxima (e quanto menor o valor de “ $n$ ”, maior é o tamanho do patamar). Esse tipo de fluxo é denominado **plug flow** (fluxo do tipo pistão) [7].

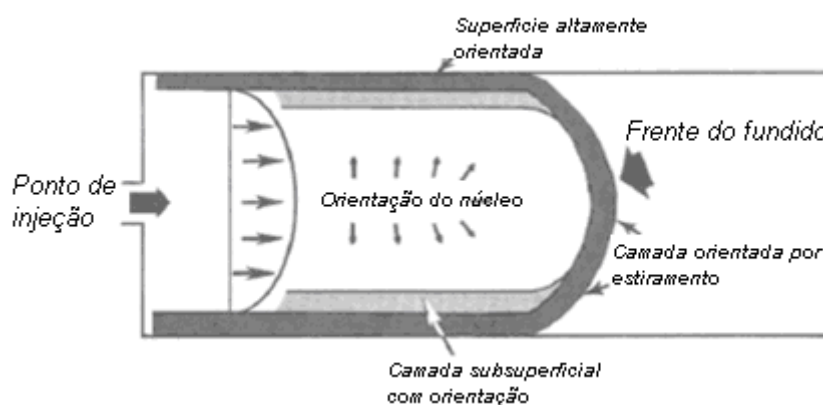
Figura 6 – Perfil de velocidade e taxa de cisalhamento para 3 fluidos com índice da lei das potências distintos.



Fonte: Adaptado de [Rosário,2005].

Esse tipo de fluxo faz com que a taxa de cisalhamento seja zero em uma grande porção do fluxo, e, como a taxa de cisalhamento é a responsável pela orientação molecular, na região central do canal/cavidade, a orientação é baixa.

Figura 7 – Fluxo polimérico esquemático dentro da cavidade do molde, mostrando variação da morfologia ao longo da espessura do molde.



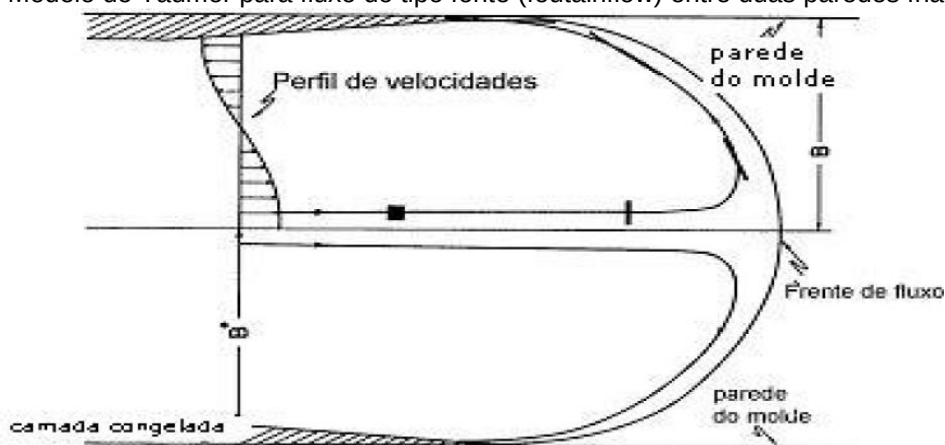
Fonte: Adaptado de [Rosato, 2000].

Considerando que as paredes do molde estão muito mais frias que o fundido, há uma formação de fluxo do tipo fonte (*fountainflow*). O material, ao entrar em contato com a parede fria, se solidifica muito rápido formando uma camada congelada. As maiores taxas de cisalhamento, assim como os maiores

graus de orientação ocorrem em regiões próximas à essas camadas congeladas.

O fluxo do tipo fonte foi modelado por Tadmor [19]. Segundo esse modelo, a orientação molecular ocorre preferencialmente ao longo do fluxo. O exemplo esquemático é mostrado na figura 5.

Figura 8 – Modelo de Tadmor para fluxo do tipo fonte (fountainflow) entre duas paredes frias.



Fonte: Adaptado de [Yamakawa,2000].

A taxa de cisalhamento, assim como a variação de temperatura, é maior em regiões mais próximas às paredes do molde. Na região central da cavidade, ocorre um resfriamento mais lento, devido ao fato de que as camadas previamente solidificadas de polímero são isolantes térmicos. Assim temos uma variação de orientação ao longo da peça e, portanto, uma anisotropia de propriedades dependendo da direção considerada. O grau de orientação molecular e a espessura da camada congelada são importantes, pois influenciam as propriedades mecânicas [13, 20].

Portanto, entender o fluxo polimérico é de grande importância para se estimar como será a orientação molecular e a morfologia do produto injetado. No próximo tópico será mostrado como os parâmetros de injeção afetam a orientação molecular e a influência da mesma na morfologia e nas propriedades de materiais injetados.

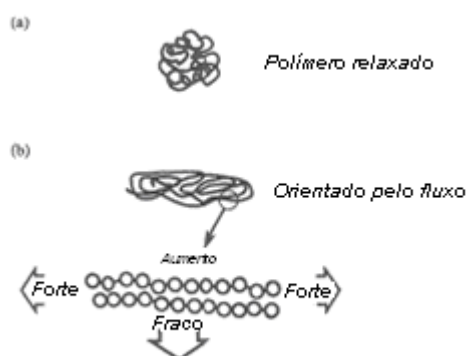
### 3.4.2 Orientação molecular

Entender a orientação molecular é de fundamental importância no processo de moldagem por injeção, visto que ela afeta as características e propriedades dos produtos injetados, assim como depende das condições de moldagem escolhidas. Segundo Rosato, a orientação em polímeros pode ser definida como o alinhamento de suas cadeias poliméricas, sejam elas sob tensão ou não, sendo que tensões residuais não são um pré-requisito para ocorra a orientação. [4]

As cadeias poliméricas possuem um estado de relaxamento preferencial; se as cadeias não estiverem congeladas, moléculas na fase amorfa adotarão a conformação enovelada. Quando a massa fundida do polímero é forçada através dos canais de alimentação e das cavidades do molde, os novelos sofrem distorção devido às forças de estiramento e cisalhamento, e a distorção promove o alinhamento de cadeias. [4]

Este alinhamento produz anisotropia (variação de propriedade conforme a direção considerada) em peças injetadas. Os polímeros são fortes na direção orientada porque as ligações covalentes intramoleculares são muito mais fortes do que as forças secundárias que atraem cadeias vizinhas.

Figura 9 — Diferentes conformações das cadeias poliméricas. A) Cadeia polimérica no estado relaxado (enovelado) e b) cadeias orientadas ao longo do fluxo.

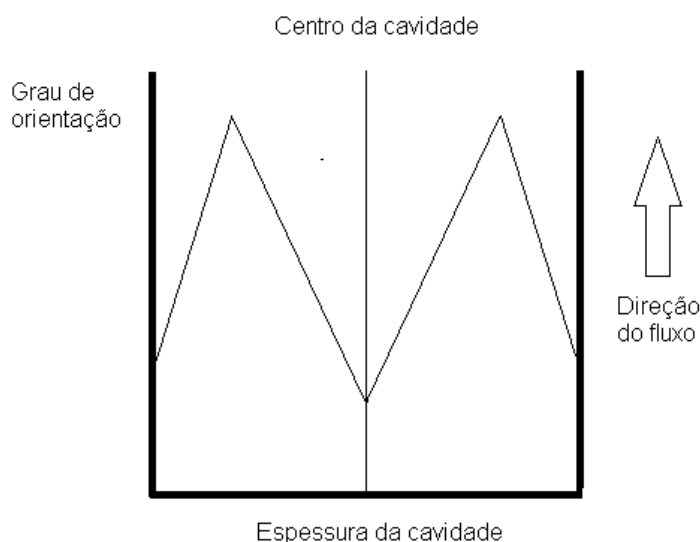


Fonte Adaptado de [Rosato,2000].

Peças injetadas não apresentam orientação igual na peça injetada; o grau de orientação varia tanto ao longo da espessura da cavidade quanto ao longo do comprimento. Essa variação depende das condições de moldagem, mais precisamente das condições de fluxo, temperatura e pressão em cada

ponto do molde. Como consequência, as propriedades do moldado também apresentam variação conforme a região considerada, sendo que a distribuição da orientação determinará quais propriedades são afetadas [4]. A figura 10 mostra esquematicamente a variação do grau de orientação ao longo da espessura.

Figura 10 – Variação do grau de orientação ao longo da espessura da cavidade.



Fonte: O autor.

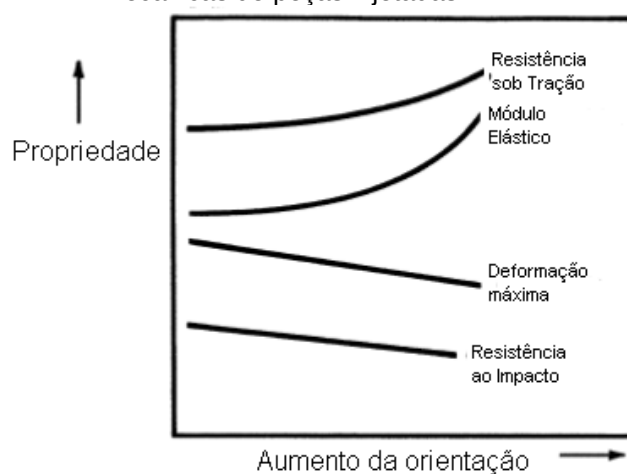
A orientação é máxima na região próxima à parede do molde e mínima no centro da peça, devido as taxas de cisalhamento mais elevadas nas regiões próximas às camadas congeladas. Na parede do molde, devido às camadas congeladas, a orientação não é máxima, mas é superior ao grau de orientação do centro da cavidade. A orientação molecular pode ser acidental ou intencional. A orientação acidental é tolerável desde que com moderação, pois tensões congeladas em excesso tornam a peça muito susceptível ao *stress cracking* devido ao ambiente, reagentes químicos, calor etc [4].

Inicialmente, as moléculas se apresentam relaxadas, mas durante o processamento, as moléculas tendem a ser mais orientadas do que relaxadas, particularmente quando sofrem cisalhamento, como ocorre durante a moldagem por injeção. Após o calor e a pressão serem aplicados e o polímero fundido atravessar os canais e cavidade do molde, as moléculas sofrem alinhamento.

O resultado é uma mudança nas propriedades e dimensões. O grau de mudança depende do tipo de termoplástico, quantidade de restrição e, mais importante, sua taxa de resfriamento. Quanto maior a taxa, maior o grau de orientação remanescente do estado fundido. Após o processo, as peças podem submetidas ao alívio de tensões para reduzir as tensões residuais [4].

O grau de orientação afeta as propriedades dos moldados, tanto em polímeros amorfos quanto em cristalinos, devido ao fato de que a orientação afeta o grau de cristalinidade.

Figura 11 – Efeito esquemático do grau de orientação em diferentes propriedades mecânicas de peças injetadas.



Fonte: Adaptado de Rosato, [2000].

Um ponto que deve ser considerado é a direção considerada em relação a Resistência sob Tração e sob Impacto. A Resistência sob Tração (RT) Longitudinal (ao longo do fluxo) aumenta com o acréscimo da orientação, enquanto a RT perpendicular tende a cair com aumento do grau de orientação. No caso da Resistência ao Impacto (RI), cadeias poliméricas perpendiculares à direção da trinca absorvem maior quantidade de energia do que quando estão na mesma direção da trinca. Portanto, quando a orientação se encontra numa direção perpendicular ao caminho percorrido pela trinca, há um aumento da Resistência ao Impacto do que cadeias ao longo do caminho da trinca.

### 3.4.3 Influência dos parâmetros de injeção na orientação

Como dito no tópico anterior, o grau de orientação depende das condições de processamento, tais como temperaturas do molde e do fundido (que controlam a taxa de resfriamento do polímero), pressão de compactação, taxa de enchimento (afetada pela velocidade de injeção), entre outros.

Em relação à taxa de enchimento, preenchimentos mais rápidos tendem a aumentar o grau de orientação na superfície da peça e diminuir na região do núcleo. No caso do ABS, as camadas cisalhadas se concentram principalmente perto da parede do molde, onde o cisalhamento é máximo. Como resultado, a região central (núcleo), devido ao escoamento *plug flow*, escorrega ao longo das camadas superficiais. Este mecanismo reduz o cisalhamento no núcleo, minimizando a orientação na maior parte da peça [4,7].

Por outro lado, o preenchimento mais lento minimiza a orientação da superfície e permite que o núcleo seja mais altamente orientado do que com o preenchimento rápido. Com o preenchimento lento, há menor cisalhamento na camada superficial, e o molde tem mais tempo para resfriar o polímero fundido enquanto ele está fluindo para dentro da cavidade, provocando uma orientação menos intensa localmente, mas mais uniformemente distribuída em toda a seção transversal da peça [4,11]. Portanto a velocidade de preenchimento apresenta grande influência em relação à orientação e sua distribuição: concentrada em uma fina camada superficial ou distribuída ao longo do núcleo.

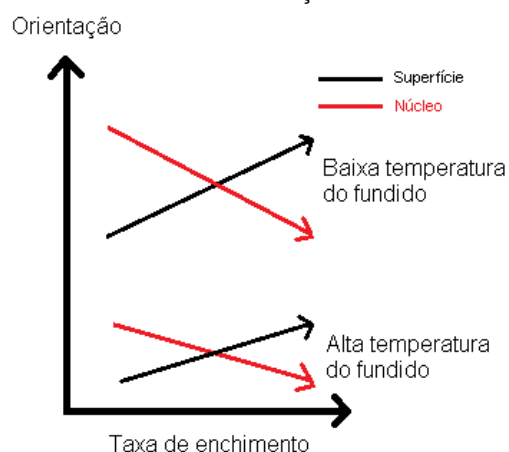
Outro ponto importante é que a taxa de preenchimento interage com a temperatura do fundido e a pressão de compactação. Um preenchimento rápido fará com que a temperatura do fundido aumente devido ao aquecimento causado pelo cisalhamento [4]. Um preenchimento rápido também permite uma melhor transferência de pressão de compactação no polímero fundido.

O segundo fator que afeta a orientação é a temperatura do fundido. No ABS, temperaturas mais elevadas geram menor orientação. O polímero fundido, quando em maiores temperaturas apresentam menor viscosidade, fazendo com que as forças de estiramento e cisalhamento, responsáveis pela orientação molecular, sejam reduzidas [4]. Além disso, temperaturas do fundido

mais elevadas promovem um maior tempo de resfriamento, permitindo uma maior relaxação do fundido (decaimento da orientação).

A Figura 12 mostra a orientação em função da taxa de enchimento e da temperatura do fundido no núcleo e na superfície do moldado.

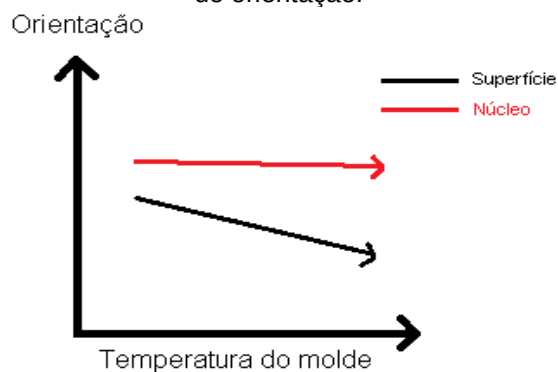
Figura 12 – Efeito esquemático da taxa de preenchimento e da temperatura do fundido no grau de orientação.



Fonte: Adaptado de [Rosato, 2000].

A temperatura do molde apresenta baixa influência sobre a orientação, quando comparada à taxa de enchimento ou à temperatura do fundido. Temperaturas do molde mais elevadas tendem a reduzir a orientação do núcleo, pois o fundido resfria mais lentamente, permitindo mais tempo para o relaxamento da orientação [21]. Uma relação esquemática entre grau de orientação e temperatura é mostrada na figura 13.

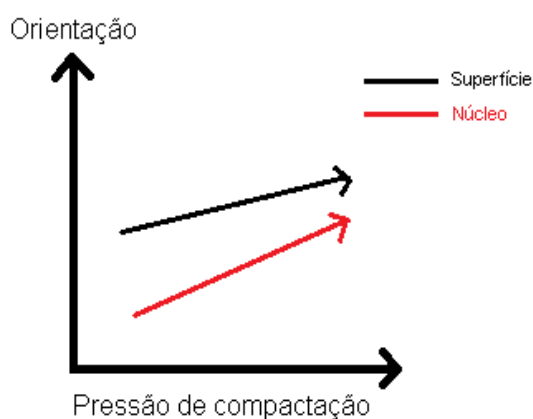
Figura 13 – Efeito esquemático da taxa de preenchimento e da temperatura do fundido no grau de orientação.



Fonte: Adaptado de [Rosato,1991].

Por fim a pressão de compactação também apresenta uma influência no grau de orientação do moldado. Se houver um colchão de polímero fundido e o tempo de compactação for suficiente, pressões de compactação mais elevadas tendem a aumentar a orientação. Um lento fluxo de arraste pode ocorrer durante a etapa de compactação, para compensar o resfriamento e o encolhimento do fundido na cavidade [22]. Esse fluxo lento gera orientação no núcleo, particularmente perto do ponto de injeção. Pressões mais altas também podem reduzir o relaxamento do fundido, permitindo que a orientação, induzida durante o estágio de preenchimento, seja mantida. [4] O efeito esquemático da pressão de compactação no grau de orientação é mostrado na figura 14.

Figura 14 – Efeito da pressão de compactação no grau de orientação da superfície e do núcleo da peça injetada.



Fonte: Adaptado de [Rosato,2000].

### 3.4.3 Morfologia de polímeros cristalinos

Devido a diferença de extração de calor e de fluxo do material fundido dentro do molde, ocorre uma heterogeneidade na estrutura dos polímeros injetados. Em muitas observações experimentais é mostrado que, próxima a superfície, para polímeros semicristalinos, ocorre uma microestrutura cristalina lamelar altamente orientada, geralmente definida como uma estrutura de camadas. Longe das superfícies do molde, há a liberdade do polímero se cristalizar tridimensionalmente, na forma de estruturas aproximadamente esferulíticas [23]. As dimensões e morfologias de ambos tipos de estruturas dependem da história térmica, a qual é caracterizada por altos níveis de tensões em regiões próximas a superfície e que vai diminuindo conforme se aproxima do núcleo [24].

Portanto, há uma diferença de estrutura e de morfologia ao longo da espessura, como observado em estudos sobre Polipropileno Isotático. Kantz et al. [25] estudaram a morfologia de corpos de provas moldados por injeção usando microscopia ótica e difração de raios-X. Nesse estudo, foram reveladas três regiões distintas em relação a estrutura cristalina: uma camada não-esferulítica altamente lamelar, uma região com cadeias moleculares orientadas em relação à direção de injeção e um núcleo esferulítico, sem orientação preferencial. Em outro estudo. Menges et al. [26], reportaram resultados semelhantes. Fujiyama et al. [27], e posteriormente Wenig e Herzog [28] reportaram estrutura de *shish-kebab*, na região intermediária, entre núcleo e superfície.

### 3.5 PARÂMETROS IMPORTANTES DO PROCESSO DE INJEÇÃO

A configuração incorreta dos parâmetros do processo causará baixa qualidade da superfície, redução da precisão geométrica da peça, pode provocar o aparecimento de empenamento, desperdícios devido ao reaproveitamento de material mal injetado, além de aumentar o custo e o tempo de manufatura [29]. Além disso, há possibilidade de causar alterações prejudiciais nas propriedades do produto final.

São apresentadas a seguir considerações sobre os parâmetros mais importantes do processo de injeção, assim como as consequências na aparência, microestrutura e no processo de injeção como um todo.

#### 3.5.1 Temperatura do fundido

A temperatura do fundido é um parâmetro de injeção bastante pesquisado. Existe um ponto ótimo de temperatura do fundido, de forma a se permitir que o polímero possua viscosidade suficientemente baixa para escoar e preencher o molde, mas não podendo ser alta demais a fim de se evitar degradação térmica. Em vários trabalhos, pode-se notar a influência da temperatura do fundido nas propriedades mecânicas do material.

Hu et al. [30] investigaram os efeitos de diversos parâmetros de injeção na resistência a tração do Polipropileno Isotático. Nesse trabalho, foi notado que conforme a temperatura do fundido aumenta de 170 a 200°C, ocorre um aumento da resistência à tração. Porém, na faixa entre 200 e 230 °C, o aumento da temperatura levou à diminuição da resistência mecânica do PP.

Ozcelik; Kuram e Topal [31] analisaram o efeito dos parâmetros de injeção na resistência mecânica Polipropileno (PP) com presença e ausência de linha de solda, através de elementos finitos e testes experimentais. Em ambos os casos (com e sem linha de solda), a Resistência sob Tração aumentou com a elevação da temperatura do fundido.

Zhou e Mallick [32] estudaram o efeito da temperatura do fundido e da pressão de compactação nas propriedades mecânicas de tração e fadiga do sistema Polipropileno/Talco. A partir dessa pesquisa, foi concluído que esse material apresenta anisotropia (variação da propriedade conforme a direção considerada). Além disso, na direção do fluxo, a propriedade de tensão de escoamento e resistência a fadiga não sofreu modificação com a mudança de temperatura, mas aumentou com elevação da pressão de compactação. Por sua vez, na direção normal ao fluxo (perpendicular), as propriedades sofreram uma redução com o aumento da temperatura do fundido e aumento com a pressão de compactação.

Dar et al. [33] realizaram um trabalho onde foi avaliado o comportamento mecânico do Policarbonato (PC) em relação a temperatura do fundido, concluindo que a tensão de escoamento aumentava com a temperatura do fundido, enquanto a deformação máxima (na fratura) sofreu uma redução. Segundo os autores, esse fato ocorreu devido à combinação de tensões residuais e orientação molecular nos corpos de prova. Um aumento da temperatura do fundido promove uma redução na viscosidade, o que significa que o material orientado durante a injeção entra no molde mais quente, tendo mais tempo para relaxar, assumindo uma conformação não orientada ao se solidificar [39].

Quanto às propriedades mecânicas, maiores valores de modulo de flexão e de resistência ao impacto tendem a ser obtidos com maiores temperaturas do fundido [6] devido ao fato de que maiores temperaturas

permitem uma redução no grau de orientação, o que por sua vez favorece elevação do módulo de flexão e da resistência ao impacto (RI). Quanto a resistência sob tração, o comportamento apresenta variação, dependendo do material e da faixa de temperatura aplicada [31-32]. A resistência a flexão tende a diminuir com o aumento da temperatura do fundido [32].

Além das propriedades mecânicas, a temperatura do fundido também afeta outras características da peça. No trabalho de Kurt [34], o aumento da temperatura do fundido reduziu o encolhimento até um determinado valor de temperatura. Após esse valor, o encolhimento torna a aumentar.

Rusdi et al. [35], avaliaram como diversos parâmetro de injeção, entre eles a temperatura do fundido, afetam o enchimento do molde na moldagem por injeção. Conforme aumentava a temperatura do fundido, o tempo de enchimento do molde diminuía, devido a diminuição da viscosidade do fundido.

A temperatura do fundido também afeta a pressão da cavidade, a qual é um parâmetro importante, visto que é responsável pela qualidade final da peça injetada, tanto do ponto vista estético quanto de suas propriedades. Moon et al. [36] investigaram o efeito de diversos parâmetros de injeção nas propriedades de impacto de placas de Policarbonato. Segundo Moon et al., o aumento da temperatura do fundido provoca uma redução na pressão dentro das cavidades do molde, o que pode afetar as características finais do produto, tanto estéticas quanto as propriedades. Além disso, a temperatura é um fator importante para controle do fluxo de material dentro do molde, assim como a taxa de cisalhamento sofrida pelo fundido.

Por outro lado, no trabalho de Wang et al. [37], foi examinado o efeito dos parâmetros de injeção na pressão da cavidade, para o Polipropileno. Ao contrário do trabalho de Moon et al. [36], a pressão da cavidade aumenta de forma abrupta entre 220 e 230 °C, depois continua subindo de forma mais lenta conforme ocorre o aumento da temperatura do fundido. Segundo Wang, isso ocorre devido à redução da viscosidade com o aumento da temperatura. Há também pouca queda na pressão de injeção, que é intimamente relacionada com a pressão da cavidade.

Kashyap e Datta [38] relataram que temperaturas do fundido muito elevadas podem causar degradação, enquanto temperaturas muito baixas necessitam maiores pressão de injeção, que exige mais do equipamento e pode ocasionar defeitos no produto final. Portanto, há um ponto ótimo de temperatura do fundido. Temperaturas muito elevadas podem ocasionar defeitos, tais como rebarbas (vazamento de material por frestas), compactação excessiva, degradação térmica, variações na contração, além de elevar o tempo do ciclo visto que aumenta o tempo necessário para o resfriamento da peça. Por sua vez, temperaturas muito baixas podem alterar o acabamento superficial de forma a prejudicar a eficiência e a aparência da peça devido ao preenchimento mais lento, podendo também produzir peças incompletas, contração excessiva, linhas de soldas fracas e linhas de fluxo.

Com já mencionado, temperatura elevadas do fundido podem levar à degradação. Em temperaturas acima de 280-290°C, polímeros a base de estireno, tais como ABS e SAN, começam a se decompor por despolimerização e oxidação, e por fim, sofrem carbonização. A decomposição dos estirênicos pode começar depois dos 20 a 30 minutos de permanência a 270°C. Os polímeros que contém butadieno são mais propensos à oxidação a altas temperaturas que o Poliestireno [39].

### 3.5.2 Temperatura do molde

A temperatura do molde também é de grande importância no processo de moldagem por injeção, afetando a cinética de resfriamento do polímero fundido, podendo influenciar a morfologia e as propriedades da peça injetada. Há diversos trabalhos que avaliam a influência da temperatura do molde no processo de injeção, principalmente em relação a sua influência nas propriedades finais.

Leyva-Porras et al. [40] estudaram o efeito da temperatura do molde e da temperatura do fundido no Módulo Elástico do Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). Usando ANAVA e superfície de resposta, foi observado que a temperatura do molde tem uma influência majoritária sobre o Módulo Elástico, quando comparado à influência da temperatura do fundido.

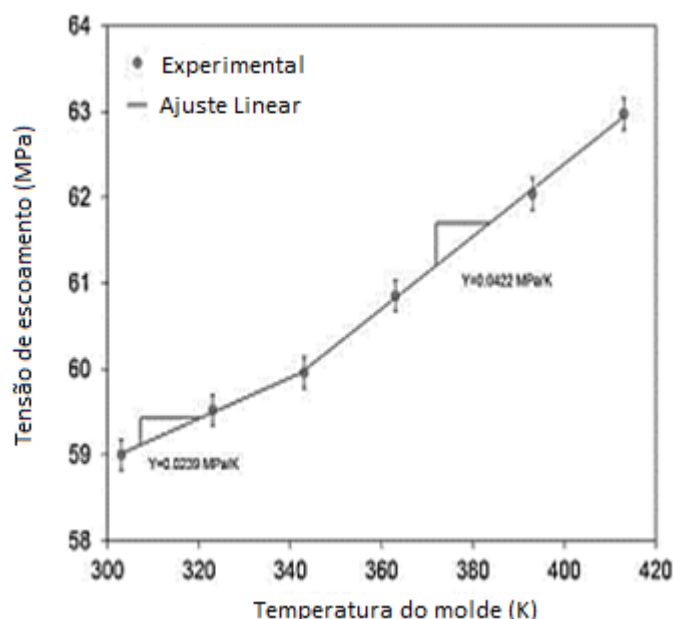
Hu et al. [30], por sua vez, em seu trabalho sobre peças injetadas de Polipropileno, notaram que a temperatura do molde tem baixa influência na resistência a tração, que aumenta levemente conforme a temperatura do molde sobe até 50 °C, caindo com o aumento subsequente da temperatura.

Li; Zhao e Yan [41] realizaram um trabalho sobre a influência da temperatura do molde no comportamento da mobilidade de fibras de vidro curtas. Em baixas temperaturas de molde, ocorreu a presença de fibras na superfície do molde. Conforme se aumentava a temperatura do molde, havia uma diminuição da rugosidade e um aumento da orientação das fibras na direção do fluxo.

Ozcelik; Kuram e Topal [31] desenvolveram um trabalho no qual foi avaliado o efeito dos parâmetros de injeção sobre as propriedades de peças injetadas de ABS, as quais apresentavam linhas de solda. Com a elevação da temperatura do molde espécimes de ABS apresentavam um aumento na resistência mecânica, além de reduções em tensões residuais e melhoria das características das interfaces da linha de solda. Em outro trabalho envolvendo linhas de solda em peças injetadas de ABS, Chen et al. [42] produziram peças de paredes finas e observaram que o aumento da temperatura do molde entre 50 e 70 °C além da temperatura ambiente melhora a resistência sob tração, tanto em peças com e sem linha de solda. Wang et al. [37] concluíram que o aumento da temperatura do molde promove um aumento na pressão da cavidade, o que pode melhorar o aspecto visual e as propriedades da peça injetada.

Dar et al. [33], investigando o comportamento mecânico do Policarbonato, observaram que o aumento da temperatura do molde promove um aumento da orientação em camadas superficiais do moldado. Por consequência, o aumento da orientação molecular promove aumento da Resistência sob Tração. Também foi observado que maiores temperaturas do molde reduzem as tensões residuais do produto injetado. O efeito na resistência a tração pode ser visto na figura 15.

Figura 15 – Variação da Tensão de escoamento com a temperatura do molde para o Policarbonato (PC).



Fonte: Adaptado de [Dar et al.,2007]

A variação da temperatura do molde altera a taxa de resfriamento do material, provocando assim alteração das propriedades. Por exemplo, no caso da poliamida, quando se diminui a temperatura do molde o grau de cristalinidade diminui rapidamente, o que pode produzir efeito como contração diferenciada e empenamentos, assim como alteração das propriedades mecânicas. [43]

Segundo a literatura, a temperatura do molde é um parâmetro de grande importância em relação a qualidade do produto final e no tempo do ciclo. Altas temperaturas tem um efeito positivo na aparência superficial e resistência mecânica [44-46], além de reduzir a pressão de injeção necessária e a força de fechamento do molde [47]. Temperaturas do molde mais baixas propiciam taxas de resfriamento mais rápidas, mas a viscosidade e a perda de pressão aumentam, causando preenchimento incorreto e/ou incompleto. Uma alta temperatura na superfície do molde reduz tensões internas, produz superfícies mais brilhantes, minimiza problemas nas linhas de junção. Entretanto, estas altas temperaturas também requerem ciclos mais longos, que permitirão resfriar o polímero permitindo ejetar a peça do molde suficientemente rígida para evitar deformações dimensionais, como empenamento.

A temperatura mínima da superfície do molde sugerida para poliestireno, por exemplo, oscila entre 30 e 40°C; abaixo destes níveis tem-se altas tensões de moldagem (por orientação e choque térmico) e problemas de empenamento e de aspecto superficial [39].

### 3.5.3 Pressão de compactação

A fim de se obter peças com bom aspecto estético, isto é, sem defeitos como encolhimento ou rechupes, é necessário controlar a pressão de compactação do processo. A pressão de compactação é a pressão aplicada após o preenchimento do molde estar completo, afim de se obter peças dentro das dimensões estipuladas.

Em alguns trabalhos foi estudado o efeito da pressão de compactação sobre a qualidade do produto injetado. Kurt et al. [34] avaliaram os efeitos das condições de moldagem no encolhimento de peças de ABS produzidas por injeção. Estes autores concluíram que o aumento da pressão de compactação provoca uma redução do encolhimento da peça injetada.

Chen e Gao [48] estudaram o efeito do perfil de compactação na qualidade de peças injetadas de Polietileno de alta densidade (HDPE). A qualidade da peça foi determinada com base no encolhimento, no peso e na distribuição da espessura do corpo de prova. Conforme se aumenta a pressão de compactação, tem-se um aumento da massa, devido a maior densidade do corpo de prova, assim como uma redução do empenamento da peça. Por sua vez a distribuição de espessura ao longo da peça varia conforme o valor da pressão e o tipo de perfil utilizado.

Jansen et al. [49] avaliaram o comportamento do empenamento em relação à pressão de compactação utilizada. Em baixas pressões, o empenamento ocorria no lado quente. Ao elevar a pressão de compactação para valores médios, havia uma redução do empenamento, mas em altas pressões o empenamento era transferido para o lado frio. Além disso, o empenamento causa tensões residuais no material, isto é, há um perfil de tensões residuais de acordo com a pressão utilizada.

Liparoti; Sorrentino e Titomanlio [50] pesquisaram como a pressão de compactação afeta peças injetadas de Polipropileno (PP) Isotático. A partir desse trabalho, foi notado que houve alteração na morfologia dessas peças, onde apenas em baixas pressões de compactação não havia o aparecimento de camadas altamente orientadas por estiramento (ver tópico 3.4.2, figura 7).

Shokrie e Bhatnagar [51] avaliaram o efeito da pressão de compactação na orientação de fibras em polímeros reforçados. A partir dos resultados experimentais, concluíram que o aumento da pressão de compactação diminui a orientação das fibras na direção do fluxo.

Ozcelik; Kuram e Topal [52] notaram que a pressão de compactação tem baixo efeito na Resistência sob Tração, em peças com ou sem linha de solda. A Resistência ao Impacto por sua vez apresentou um comportamento anômalo, isto é, não foi possível traçar o comportamento dessa propriedade conforme variava-se a pressão de compactação.

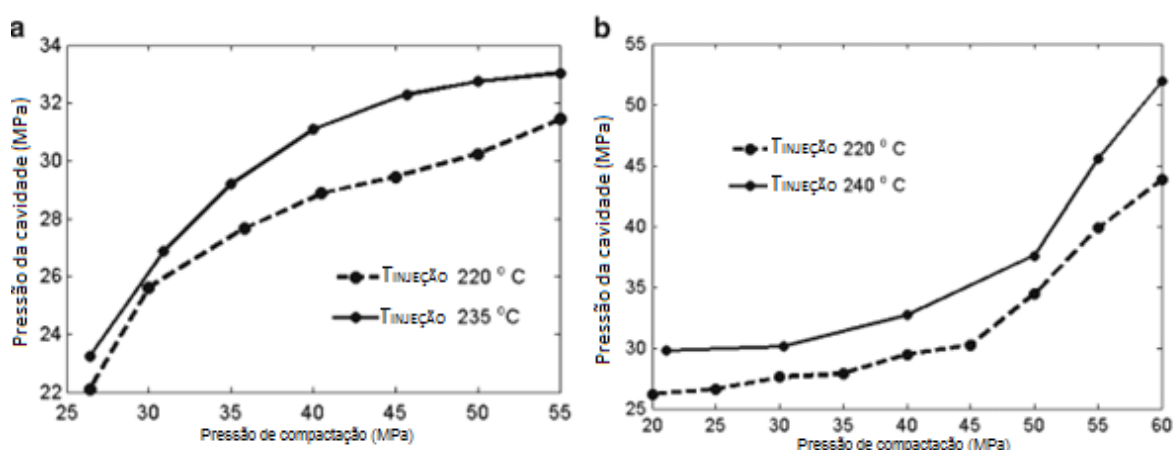
Kagitci e Tarakcioglu [53] estudaram o efeito da linha de solda na resistência sob tração de compósitos poliméricos, relacionando juntamente os efeitos de diversos parâmetros de injeção. Eles chegaram à conclusão de que maiores pressões de compactação melhoram a resistência da linha de solda, mas deve-se observar o comportamento da pressão de compactação com os outros parâmetros.

Dar et al. [33] pesquisaram o efeito dos parâmetros de injeção no comportamento mecânico do Policarbonato, relatando que o aumento da pressão de compactação elevou em pequeno grau a tensão de escoamento do PC. Ozcelik; Ozbay e Demirbas [31] examinaram o efeito dos parâmetros de injeção e do tipo de material do molde nas propriedades mecânicas do ABS. De acordo com o estudo, a pressão de compactação somente teve grande influência na deformação de ruptura para o molde de alumínio.

Um tópico bastante analisado é o efeito da pressão de compactação na pressão da cavidade devido à sua grande importância sobre as características de peças produzidas por injeção. Hassam [54] estudou o efeito da pressão de compactação na pressão da cavidade e no peso das amostras. A microestrutura, propriedade e qualidade foram afetadas pelas etapas de

compactação e resfriamento. A partir desse estudo, pode-se comprovar que a pressão da cavidade aumenta com a pressão de compactação, e o perfil de aumento muda dependendo do material, como mostrado na figura 4.

Figura 16 — Efeito da pressão de compactação e da temperatura de injeção na pressão da cavidade para a) Poliestireno (PS) e b) Polietileno de Baixa Densidade (PEBD).



Fonte: Adaptado de [Hassam, 2012]

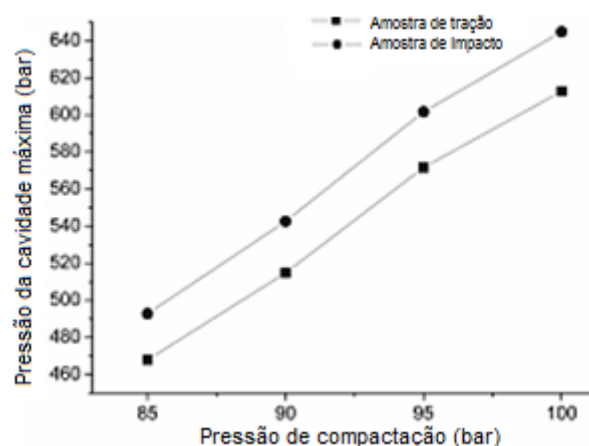
Wang et al. [37] também investigaram como a pressão de compactação, entre outros parâmetros de injeção, influenciava peças de Polipropileno. Eles usaram um molde que produzia um corpo de prova de tração e um de impacto a cada ciclo de injeção. Dos parâmetros estudados, a pressão de compactação foi o fator mais importante na pressão da cavidade, quando comparado à temperatura do molde, temperatura do fundido, tempo de compactação e pressão de injeção.

Segundo Wang et al. [37], esse aumento na pressão da cavidade é devido ao fato de que baixas pressões de compactação não tornam possível superar a resistência de canais de alimentação. Conforme se eleva a pressão de compactação, essa resistência pode ser superada, e o fluxo de material fundido entra suavemente na cavidade, elevando a pressão da cavidade em si. A relação entre a pressão de compactação e a pressão da cavidade é demonstrada na figura 5.

Deve-se levar em conta que Hassam utilizou o Poliestireno (PS) e o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), enquanto Wang et al. usaram

Polipropileno (PP). Além disso, o tipo de molde utilizado apresenta uma influência considerável. De qualquer forma, as relações de proporcionalidade são semelhantes.

Figura 17 – Efeito da pressão de compactação na pressão de cavidade para o Polipropileno (PP).



Fonte: Adaptado de [Wang et al., 2017]

A pressão de compactação tem como função preencher o molde a fim de compensar o encolhimento provocado pelo resfriamento do material [55]. A pressão de compactação é de grande importância na pressão da cavidade. A pressão da cavidade é um dos fatores primários que afetam a moldagem por injeção, sendo que seu perfil durante o processo afeta a qualidade do produto final. [56]. O perfil de pressão na cavidade, assim como sua repetitividade durante as injeções, afeta a estabilidade dimensional, comportamento mecânico e qualidade da superfície [57]. Além disso, o conhecimento da pressão tem utilidade para estimar o encolhimento da peça e a força de fechamento do molde necessários para tal atividade.

Os valores da pressão de cavidade afetam o empenamento do produto e as tensões residuais produzidas durante a moldagem por injeção, assim como, mudanças nas propriedades físicas das peças [37]. A qualidade e as propriedades da microestrutura, tais como birrefringência, tensões residuais, distribuição de densidades e encolhimento dos produtos, estão intimamente relacionadas as condições de compactação e resfriamento.

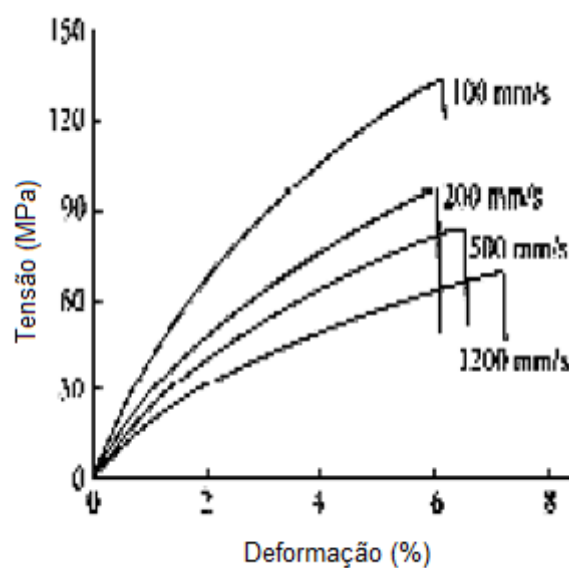
Portanto, um entendimento da pressão durante os estágios de pós-enchimento é de grande importância para determinação e obtenção das

melhores propriedades mecânicas e para um melhor controle de processo e da qualidade do produto final [58].

### 3.5.4 Velocidade de injeção

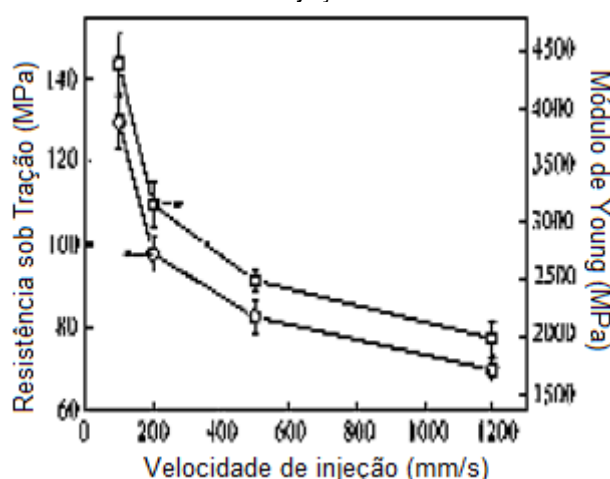
A velocidade de injeção é um parâmetro cujo efeito em materiais injetados não é totalmente conhecido. Muitos estudos visaram avaliar o efeito da velocidade de injeção nas propriedades e na microestrutura. Jiang et al. [59] investigaram o efeito da velocidade de injeção na estrutura e propriedades do Polietileno de Alta Densidade (PEAD), como demonstrado nas figuras 6 e 7, podendo concluir que o aumento da velocidade de injeção provoca a queda tanto da Resistência sob Tração quanto do Módulo Elástico e provoca o aumento da deformação máxima.

Figura 18 — Curvas de tensão-deformação para diferentes velocidades de injeção.



Fonte: Adaptado de [Jiang,2011].

Figura 19 – Módulo de elasticidade e resistência a tração para diferentes velocidades de injeção.



Fonte: Adaptado de [Jiang,2011].

Raos e Stojisic [60] estudaram o efeito da velocidade e da pressão de injeção na resistência sob tração do Polietileno. Usando ANAVA e superfície de resposta, eles concluíram que, dos dois fatores estudados, a velocidade de injeção teve pouco efeito nessa propriedade quando comparado ao efeito da pressão de injeção.

Ozcelik; Kuram e Topal [52] estudaram o efeito da velocidade de injeção na resistência da linha de solda do Polipropileno no qual observaram que maiores velocidades de injeção geram maiores resistências mecânicas. Segundo Damiani [43], a velocidade de injeção, aliada a pressão de injeção podem influenciar a cristalinidade, devido ao fato de que esses dois parâmetros controlam a taxa de resfriamento, mesmo que superficialmente. Fernandes et al. [61] avaliaram a influência da velocidade de injeção em peças injetadas de Polipropileno. Maiores velocidades de injeção contribuem na diminuição da variação das dimensões e do formato das peças, pois reduzem o empenamento e a contração das peças injetadas.

Porcel [62] identificou que em velocidades de injeção maiores promovia uma estrutura mais refinada do ABS, onde houve uma melhor distribuição das partículas de SAN (Estireno-Acrilonitrila). Chen et al. [63] investigaram o efeito da velocidade de injeção em compósitos de poliamida-argila, sendo que seu estudo demonstrou que a Resistência sob Tração (RT) aumenta com o aumento da velocidade de injeção. Entretanto em outros estudos o resultado foi

o contrário. Narh et al. [64] usando blendas de PET/LCP (Polietileno tereftalato/Cristal Líquido Polimérico), obtiveram resultados nos quais o aumento na velocidade de injeção reduzia as propriedades de resistência sob tração.

A velocidade de injeção é parâmetro importante no processo de injeção e, assim como a temperatura do fundido, também não deve ser muito alta nem muito baixa, a fim de não prejudicar o processo. Velocidade de injeção baixa pode ocasionar preenchimento incompleto da peça, formação de rechupes e vazios, linhas de soldas fracas, recalque deficiente e marcas de fluxo na peça, além de ciclos mais lentos. Por outro lado, velocidade de injeção alta acelera o ciclo de injeção, mas aumenta a chance de degradação do material, esguichamentos e carbonização a frente do fluxo.

### 3.6 MÉTODO TAGUCHI

O método Taguchi é uma poderosa abordagem para solucionar problemas de qualidade em vários aspectos no campo da engenharia. A contínua satisfação do cliente e viabilidade econômica num ambiente competitivo da indústria plástica está ganhando grande atenção. Portanto, o método Taguchi oferece uma abordagem simples e sistemática para otimizar desde projeto até performance, melhorando a qualidade do produto, assim como reduzindo seu custo. Vários estudos atestam a eficiência desse método para a indústria dos materiais plásticos, otimizando propriedades dos materiais poliméricos e as características dos produtos, como na redução de defeitos visuais, sendo que alguns exemplos da aplicação do Taguchi serão mostrados a seguir.

#### 3.6.1 Técnicas para otimização da moldagem por injeção

Há bastante tempo, busca-se otimizar processos e produtos, sendo que essa otimização pode ocorrer antes mesmo de peça ou processo ser produzido, isto é, durante a fase de concepção do mesmo. Uma técnica muito utilizada é a simulação computacional via Método dos Elementos Finitos que “consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são

descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados. "(LOTTI et al., 2011) [65].

Entretanto, a análise por esse método é complexa devido ao grande número de análises que geralmente são requeridas num processo de otimização de vários parâmetros. No intuito de diminuir cálculos computacionais, surgiram alguns métodos alternativos, como por exemplo, a regressão polinomial, a rede neural artificial e a regressão do vetor suporte. Estes modelos podem ser usados para a construção de uma aproximação matemática a fim de substituir as análises por elementos finitos.

Zhou; Turng e Kramschuster al [66] utilizaram a regressão de vetor como suporte para otimizar o processo de injeção por moldagem. Shen; Wang e Li [67] otimizaram os parâmetros do processo usando modelo de rede neural e algoritmo genético para reduzir a máxima diferença de contração volumétrica para a cobertura de um refrigerador industrial. Kurtaran; Ozcelik e Erzurumlu [68] realizaram o processo de otimização no intuito de reduzir o empenamento das lâmpadas de teto de ônibus usando também a rede neural e o algoritmo genético. Em outro trabalho, Kurtaran e Erzurumlu [69] combinaram uma metodologia de superfície de resposta com algoritmo para otimização dos parâmetros de processo a fim de reduzir o empenamento de componentes de parede fina. Yin et al. [70] desenvolveram um modelo de rede neural de propagação de retorno para previsão do empenamento, em compartimentos de veículos. Propuseram ainda, uma combinação híbrida de rede neural com algoritmo para otimização dos parâmetros do processo de moldagem por injeção.

Uma técnica que vem recentemente ganhando destaque, a qual tem obtido proeminentes resultados, é o Método Taguchi. Desenvolvido por Taguchi e Konishi [71], tem sido amplamente aplicado para otimizar processos na área de engenharia.

### 3.6.2 Descrição geral do Método Taguchi

A qualidade pode ser definida no estágio de desenvolvimento do produto ou processo, e a melhoria da qualidade pode continuar na fase de produção

[72]. O planejamento de experimentos (do inglês, *Design of Experiments* ou DOE) baseado na metodologia Taguchi é uma abordagem efetiva e influente na produção de produtos plásticos de boa qualidade.

A abordagem de Taguchi propicia a engenheiros e projetistas uma ferramenta sistemática e efetiva para conduzir experimentos com recursos estatísticos limitados [73], onde os diversos parâmetros do processo podem ser investigados e entendidos, mesmo com recursos e orçamento reduzidos [74].

O Método Taguchi, também conhecido por projeto robusto, vem sendo cada vez mais popular e tem sido bastante utilizado na melhoria da produtividade na qualidade. Este método é simples e confiável, geralmente usado para controle de qualidade *off-line*, a fim de se obter produtos de alta qualidade e determinar as condições otimizadas para os parâmetros controláveis do processo [75–77]. Métodos *off-line* são utilizados fora da linha de produção. Ou seja, o método Taguchi pode ser aplicado desde a fase de concepção (projeto) do produto [78].

Através desse método, as melhores faixas para o projeto da qualidade, performance e custo pode ser determinada sistematicamente [79, 80]. Segundo Taguchi, há três fases do desenvolvimento do produto: desenho ou projeto de sistema (engenharia), desenho ou projeto de parâmetros (experimental) e desenho ou projeto de tolerâncias (opcional) [80]. Das três etapas, o projeto dos parâmetros de Taguchi é frequentemente identificado como a etapa mais crucial na otimização do processo [81, 82].

O projeto ou desenho de sistema é a concepção e a síntese de um produto ou processo a ser utilizado. A fase de concepção do sistema pode ser considerada como o ponto de aplicação de novas ideias, conceitos e conhecimentos nas áreas de ciência e tecnologia, cujos conceitos podem ser utilizados pela equipe de projeto para determinar a combinação apropriada de materiais, peças, processos etc., fatores estes que irão satisfazer as especificações funcionais e econômicas. Para alcançar um aumento na qualidade exige-se inovação e, portanto, melhorias, as quais nem são sempre realizadas [83].

O projeto de parâmetro é principalmente usado para obter os níveis otimizados dos parâmetros do processo, a fim de se elevar as características de qualidade e determinar os valores dos parâmetros do produto baseado nos valores otimizados do processo [84]. Em geral, o projeto de parâmetro do Método Taguchi utiliza arranjos ortogonais, as razões S/N e análise de variância (ANAVA).

No projeto ou desenho de parâmetro, as variáveis do sistema são experimentalmente analisadas para determinar a forma como o produto ou processo reage com "ruído" incontrolável no sistema. O projeto de parâmetro é o principal atributo da abordagem de Taguchi. Essas variáveis são definidas na primeira fase. Projeto de parâmetro está relacionado a encontrar os níveis de fator de projeto adequados para tornar o sistema menos sensível as variações de fatores incontroláveis de ruído, isto é, para tornar o sistema robusto. Desse modo, o produto tem um melhor desempenho, reduzindo-se perdas [83].

O projeto de parâmetro é usado para obter valores otimizados para os parâmetros do processo, no intuito de desenvolver as melhores características e determinar os valores dos parâmetros do produto, dependendo dos parâmetros otimizados [69]. O passo final na abordagem do Método Taguchi é o projeto de tolerância. O design de tolerância ocorre quando as tolerâncias para os produtos ou processos são estabelecidos para minimizar a soma dos custos de produção e vida útil do produto. Essa fase é de uso facultativo e recomendada se a parte experimental na fase de projeto ou desenho dos parâmetros apresentar grande variabilidade [78], isto é, se os valores alvo de qualidade ainda não forem atingidos [83].

Há uma tendência em associar qualidade com menores tolerâncias, mas, na prática, as tolerâncias menores aumentam o custo do produto ou do processo, porque exige melhores materiais, componentes ou máquinas para não ultrapassar as tolerâncias. Na abordagem de design de parâmetro de Taguchi há a prerrogativa que permite a melhoria da qualidade sem a necessidade de melhores materiais ou de peças, fazendo com que seja possível aprimorar a qualidade e reduzir o custo, ou pelo menos, manter no mesmo patamar [83].

Os arranjos ortogonais são designs ou modelos que são utilizados para estimar os efeitos principais de cada parâmetro com poucas etapas experimentais. Esses designs podem ser usados além de apenas dois níveis, podendo ser usado para investigar os efeitos dos parâmetros ou fatores com mais de dois níveis e até mesmo quando são níveis desiguais, como 3-2-3, 2-2-3, etc [75,79]. Nesses casos, usam-se designs especiais, tais como L4, L8, L12 e L16 para o estudo de todos os níveis dos parâmetros com pequeno número de experimentos.

O método Taguchi Ortogonal é uma ferramenta excepcional para o desenvolvimento de sistemas de alta qualidade, utilizando uma aproximação integrada, a qual é simples, prática e eficiente, para determinar as melhores faixas de valores para a qualidade, performance e de custo [83]. Então pode se definir que principal objetivo do método Taguchi Ortogonal é aprimorar as características do processo ou de um produto, através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis, que tende a minimizar a variação do produto final, em relação ao seu objetivo.

Esse método pode reduzir os custos de pesquisa e desenvolvimento e, simultaneamente, estudar um grande número de parâmetros [85-86]. Além disso, arranjos ortogonais também permitem aos pesquisadores ou projetistas estudar vários parâmetros simultaneamente e pode ser usado para estimar os efeitos de cada fator [74,87-88], separando os níveis e parâmetros em fatores parciais. Através de arranjos ortogonais, o número de experimentos que ocasionam o aumento do tempo e do custo pode ser reduzido [78].

Para a análise dos resultados, o método Taguchi usa uma medida estatística de performance, denominada razão S/N. Essa razão leva em conta tanto a média quanto a variabilidade. O *Signal-to-noise* pode ser dividida em duas partes: *signal* representa o valor desejável; *noise* (ruído) representa o valor indesejável. O objetivo de usar S/N é como uma medida da performance de produtos e processos insensíveis aos fatores de ruídos (*noise factors*) [89]. A razão S/N indica o grau de performance do produto ou processo que pode ser prevista na presença dos fatores de ruído. As fórmulas das razões S/N foram

projetadas para que seja selecionado o melhor nível do(s) fator(es) para otimizar as características de qualidade do experimento.

Há três formas de calcular a razão S/N, a qual é escolhida dependendo de como é necessário melhorar aquela característica: *Smaller-the-better*, *Nominal-the-better* ou *Larger-the-better* [85,90]. Os parâmetros de processo com os maiores valores de S/N são aqueles que apresentam os melhores valores para aquela característica com a mínima variação possível. Entendimento adicional sobre o conceito do Método Taguchi pode ser encontrado em Taguchi [91], Phadke [92] e Roy [93].

Para uma melhor visualização da eficácia deste método, os tópicos seguintes apresentam algumas das aplicações do método Taguchi na melhoria da qualidade de produtos e processos, assim como na melhoria das propriedades dos materiais que compõe esses produtos.

### 3.6.3 Método Taguchi aplicado para melhoria da qualidade do produto

De acordo com Yang e Gao [94], a qualidade do produto pode ser caracterizada em termos da estabilidade dimensional, aparência ou valores estéticos e suas propriedades mecânicas. O método Taguchi foi implementado na melhoria da qualidade de produtos plásticos produzidos por várias técnicas, tais como moldagem por injeção, rotomoldagem e moldagem por injeção assistida por gás, ganhando destaque por sua versatilidade e eficiência.

#### 3.6.3.1 Estabilidade dimensional

A estabilidade dimensional é um dos principais critérios de qualidade para produtos plásticos. A manutenção da forma precisa da peça, especialmente com baixas tolerâncias é um consenso entre muitos pesquisadores, devido ao fato de que defeitos como empenamento e encolhimento são bastante influenciados pela estabilidade dimensional do material. Na prática, esses defeitos são influenciados pela seleção de material [95], projeto de molde e de peça [97-99] e pelos parâmetros de processo [98-101].

A redução do empenamento tem sido de grande interesse para alguns pesquisadores, além do efeito da estabilidade dimensional no mesmo. Huan e Tai [102], Liao et al. [103], Ozcelik e Erzurumlu [104] e Ozcelik e Sonat [105] usaram o arranjo experimental do método Taguchi no intuito de examinar os efeitos dos parâmetros de processo no empenamento em peças com paredes finas, produzidas por moldagem por injeção. Dentre os parâmetros estudados por esses autores, pode-se citar a temperatura do molde, temperatura do fundido, pressão de compactação, tempo de compactação, tempo de enchimento e velocidade de injeção. Como conclusão, foi descoberto que a pressão de compactação foi o fator mais importante, isto é, com mais influência sobre o empenamento.

Huang e Tai [102] e Ozcelik e Erzurumlu [104], também estudaram outros aspectos do processo, incluindo localização dos pontos de injeção, tipo de canal e tempo de enchimento e resfriamento, mas esses fatores não apresentaram grande efeito em partes com paredes finas. Tang et al. [106] focou no estudo de um defeito similar ao que é o empenamento para paredes finas, descobrindo que a temperatura do fundido é um fator mais importante e que o tempo de enchimento afeta pouco o empenamento.

Chen et al. [107] também estudaram a minimização do empenamento em peças de paredes finas. Os autores combinaram a aplicação do Moldflow com arranjos ortogonais L18, no intuito de reduzir a variação do empenamento. Através dos resultados da ANAVA, o estudo indicou que a temperatura do fundido e a pressão de compactação foram os principais parâmetros que afetaram o empenamento, tanto na simulação quanto nos experimentos.

No trabalho de Song et al. [108] também foi estudado o problema do empenamento em peças com paredes ultrafinas. Dos parâmetros estudados (velocidade de injeção, pressão de injeção, temperatura do fundido, espessura da peça e dimensões), os resultados apontaram que a espessura do componente é decisiva, e que as dimensões são os fatores com maior influência no processo de moldagem. Por sua vez, a temperatura do fundido e a pressão de compactação são fatores secundários, mas altos valores de temperatura e pressão são necessários no processo com um todo.

Chen et al. [109] investigaram como o empenamento atua no processo de moldagem de injeção assistida por gás (GAIM – *GasAssistedInjectionMolding*), concluindo que ao se usar baixa velocidade de injeção de gás, alta temperatura do fundido, alta pressão de gás e altos tempos de compactação por gás, foi possível minimizar o empenamento total.

Liu e Yang [110] avaliariam os efeitos dos parâmetros do processo de GAIM no empenamento, em relação a duração da penetração de gás em componentes com paredes finas. Usando um polímero amorfo, a Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS), eles identificaram que a temperatura do fundido e a pressão do gás são os parâmetros que mais afetaram o empenamento. Por sua vez, no polímero semicristalino, Polipropileno (PP), os fatores que mais influenciaram foram a pressão do gás e tempo de atraso da injeção do gás. Além disso, o empenamento também reduzia com o aumento da duração da injeção de gás.

Lee e Kim [111] intencionalmente variaram a espessura de uma parede fina no intuito de reduzir o empenamento do componente produzido por injeção. Foi concluído que, ao variar a espessura da parede fina, obtém-se melhores características sobre o empenamento.

Estudos envolvendo a rotomoldagem (RM), usando método Taguchi também aparecem na literatura. A rotomoldagem é a principal técnica de processamento para produzir peças plásticas ocas. Mas a eficiência geral desse processo é ofuscada pelo empenamento dos componentes produzidos, devido ao projeto inadequado do molde e pelos parâmetros do processo.

No trabalho de Liu e Chen [112], a qualidade das peças e componentes foi melhorada usando método Taguchi. Usando arranjos ortogonais L18, concluíram que, dos parâmetros de processo estudados (agente desmoldante, condição de resfriamento, tempo do forno, temperatura do forno, tamanho do pó e pigmento utilizado), a condição de resfriamento foi a que teve maior influência sobre o empenamento.

O empenamento também pode ser associado com a variação do encolhimento. Oktem et al. [113] conduziram experimentos com três níveis, usando arranjos ortogonais L9 e L27 e simulação via Moldflow a fim de avaliar

parâmetros que afetam o encolhimento. A partir do ANAVA, a pressão de compactação teve uma influência majoritária no empenamento, seguida pelo tempo de injeção e tempo de resfriamento. Assim, usando as condições otimizadas, houve melhoria de 2,17% no empenamento e 0,7% no encolhimento.

Segundo Lee e Kim [114], o empenamento pode ocorrer devido ao encolhimento em áreas que apresentam paredes finas. O empenamento que ocorre durante o processo de moldagem, resultante das diferenças do encolhimento dos materiais constituintes, tem sido um problema crítico na indústria eletrônica. Teng e Hwang [115] aplicaram o método Taguchi no intuito de identificar a influência de alguns parâmetros no grau de empenamento, obtendo as condições otimizadas, provando a eficiência do método Taguchi, mesmo com número limitado de experimentos/simulações.

Erzurumlu e Ozcelik [116] visaram reduzir o empenamento e rechupe em peças e componentes, estudando a influência da temperatura do molde, do fundido e pressão de compactação com diferentes perfis e ângulos. Usando razões S/N e ANAVA, estudaram diferentes polímeros termoplásticos, chegando à conclusão que os parâmetros têm diferentes influências no empenamento e no rechupe.

Há outros trabalhos que visam o entendimento do encolhimento, principalmente quando em aplicações que exigem tolerâncias estreitas. No estudo de Chang e Faison [117], o método Taguchi foi aplicado sistematicamente para entender os efeitos dos parâmetros de processo no comportamento do encolhimento (paralela e perpendicularmente a direção do fluxo) em três materiais diferentes. Os resultados da pesquisa mostraram que as temperaturas do molde e do fundido, juntamente com tempo e pressão de recalque são significantes no encolhimento dos três materiais.

Por sua vez, Altan [132], usando um arranjo semelhante, estudou o encolhimento no PP e no PS. Estatisticamente, as análises S/N mostram que a pressão de compactação foi mais importante no caso do PP e, para o PS, foi a temperatura do fundido. No trabalho de Wu e Su [133], conclui-se que a pressão de compactação é o fator que mais afeta o encolhimento no processo

de moldagem por injeção. Kuo et al. [134] estudaram a redução na variação dimensional de produtos injetados, usando método Taguchi e Rede Neural de Propagação de Retorno (*Back Propagation Neural Network*), otimizando os parâmetros de injeção para o Polietereetercetona (PEEK).

Além dos trabalhos citados, há na literatura muitos outros trabalhos envolvendo otimização do dimensionamento de peças e componentes, provando a eficiência do método Taguchi nesse importante quesito.

### 3.6.3.2 Aparência ou valor estético

Aparência ou valor estético são fatores importantes ao se produzir produtos injetados, devido a fato de que por defeitos como rechupes, marcas de fluxo, linhas de solda, entre outros, a peça muitas vezes é rejeitada e descartada, o que aumenta o custo de produção do processo como um todo.

Chen et al. [121] estudaram *silverstreaks* (linhas prateadas) que apareciam na superfície de para-choques automotivos, compostos de Policarbonato/Polibutileno Tereftalato (PC/PBT), usando método Taguchi, com arranjo preliminar L12, seguido do experimento principal com arranjo L18. A partir desse estudo, concluíram que os principais fatores que influenciam tal defeito são a temperatura do molde, tempo de enchimento, tipo de *switch over* (*critério de transição entre a fase de enchimento e compactação*) e a velocidade de injeção.

Linhas de solda são indesejáveis, mas muitas vezes inevitáveis, ao se produzir componentes injetados, sendo formadas durante a fase de enchimento do molde, quando as frentes de material fundido se encontram, apresentando uma aparência de linhas de trincas. Liu e Yang [96], usando arranjos ortogonais L18, estudaram o efeito de parâmetros de processo, dentre os quais temperatura do fundido e do molde, velocidade de enchimento, pressão de compactação e tamanho dos obstáculos ao fluxo, concluindo que o tamanho dos obstáculos e a temperatura do fundido são os que exercem maior influência sobre a linha de solda.

Outro defeito frequente são as marcas de rechupe. Esse defeito é uma depressão local na superfície, causada por um encolhimento localizado em seções espessas durante o resfriamento da peça. Shen et al. [122]

minimizaram este defeito, conduzindo experimentos com arranjos ortogonais L18, e descobriram que a espessura do componente, pressão de espera e as temperaturas do molde e do fundido são os fatores mais importantes. Wang et al. [123] também visaram reduzir rechupes, concluindo que a espessura da peça e a temperatura do fundido são os fatores com maior influência, de todos os fatores estudados nesse trabalho.

#### 3.6.4 Método Taguchi aplicado na melhoria das propriedades dos materiais

Muitos estudos usam o Método Taguchi como ferramenta para produzir as melhores combinações de propriedades, especialmente propriedades mecânicas.

##### 3.6.4.1 Propriedades mecânicas

Segundo Yang e Gao [94], as propriedades mecânicas são outros critérios importantes ao se produzir produtos plásticos. A performance mecânica deve ser suficiente para o produto desempenhar sua função de forma adequada. Então a melhoria das propriedades mecânicas é muito visada em estudos. Liu et al. [124] otimizou a resistência ao impacto de produtos produzidos por rotomoldagem, estudando os parâmetros do processo, tais como temperatura e tempo do forno, condição de resfriamento, material do molde e tamanho de partícula, usando um arranjo ortogonal L16, concluindo que os fatores mais importantes que afetam a resistência ao impacto são a temperatura do forno e o tempo no forno.

Focando na resistência sob tração do Polietileno de Ultra Alta Massa Molar (UHMWPE - *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*), Kuo e Jeng [125] discutiram os efeitos das condições de injeção nas propriedades mecânicas. Usando um arranjo ortogonal de três níveis do tipo L18, foram estudados os efeitos da temperatura do fundido, temperatura do molde, velocidade de injeção, pressão de compactação, tempo de compactação e tempo de resfriamento, juntamente com as dimensões da seção transversal com a presença e ausência da linha de solda.

As dimensões da seção transversal causaram grande efeito na resistência sob tração, maior que os parâmetros de processo, quando não havia linha de solda. Mas na presença desta, as dimensões da seção transversal tiveram uma redução no efeito que provocavam nesta propriedade mecânica.

No trabalho de Fung e Tien [126] foram investigadas a resistência à tração e tenacidade à fratura do Polibutileno Tereftalato (PBT) reforçado com fibra de vidro (30% em massa), usando método Taguchi e *GreyRelationalAnalysis*, sendo que os resultados indicaram que o método Taguchi é uma poderosa ferramenta quando se trata de problemas de resposta única.

Altan e Yurci [127] focaram na otimização dos parâmetros de injeção a fim de minimizar tensões térmicas residuais nas regiões de superfície do Poliestireno (PS) e do Polietileno de Alta Densidade (PEAD). A partir do ANAVA, os parâmetros mais importantes para o PS e para o PEAD foram a temperatura do fundido e a temperatura do molde, respectivamente.

Sureshkumar et al. [128] estudaram a resistência sob tração e ao impacto, para blendas de Polietileno de Baixa Densidade Linear (*Linear LowDensityPolyethylene* - LLDPE) e o elastômero Poli(DimetilSiloxano) (PDMS). Nesse trabalho foram otimizados os parâmetros de processamento tais como temperatura, velocidade de rotação e tempo num misturador usando o Método Taguchi.

Hafezi et al. [75] avaliaram as propriedades físico-mecânicas, como resistência sob tração, deformação na fratura, dureza, resiliência e envelhecimento de blendas de borracha e de Policloreto de Vinila (NBR-PVC), curada por enxofre e por feixe de elétrons. Foi usado um arranjo ortogonal L9, a fim de se determinar o efeito de três parâmetros de processo nas propriedades físico-mecânicas. Os resultados mostraram que, com exceção da resiliência, as outras propriedades da blenda NBR-PVC curadas por feixe de elétron tiveram uma melhoria de 15%, ao ser comparadas com as blendas curadas por enxofre.

No trabalho de Yang [129] foram analisadas as propriedades mecânicas do Policarbonato (PC) reforçado com 20% de fibra de vidro e 6% de Politetrafluoretileno (PTFE), produzidos por moldagem por injeção. O autor conduziu nove experimentos a fim de se determinar as condições otimizadas, concluindo que a temperatura do fundido é o fator com maior influência no módulo elástico, na tensão e na deformação máxima sob tração.

Por sua vez, Tanyildizi [130] estudou os efeitos das fibras de PP e do fumo de Sílica nas propriedades mecânicas em concreto de baixo peso exposto em altas temperaturas. A partir do ANAVA, dos três fatores de controle (porcentagem de fumo de Sílica, porcentagem de fibra de PP e da temperatura de exposição), a temperatura foi o que exerceu maior influência.

Focando na tensão de escoamento e na deformação da blenda de Policarbonato/Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (PC/ABS), Fung et al. [131] examinaram os efeitos do tempo de enchimento, temperatura do fundido, temperatura do molde e velocidade de injeção, chegando à conclusão que a temperatura do fundido é o fator que mais influencia ambas as propriedades.

### 3.7 FERRAMENTAS DO MÉTODO TAGUCHI

O método Taguchi utiliza algumas ferramentas no intuito de fazer a otimização, algumas das quais foram utilizadas nesse trabalho. Essas ferramentas são: função perda, Razão S/N, *Design of Experiments* (DOE) e Análise de Variância (ANAVA). Essas ferramentas serão discutidas nos próximos tópicos.

#### 3.7.1 Função-perda

Proposta por Taguchi, é uma função de custo apresentada pelo processo ou produto, a qual é associada ao desvio das condições consideradas ideais. Ou seja, é a diferença entre valor apresentado e o valor-alvo, podendo ser definida pela equação 1.

Equação 1 – Função-perda do Método Taguchi.

$$L(y) = k \times f(y - y_o)^2$$

Onde:

$L(y)$  – valor da função-perda, em unidades monetárias

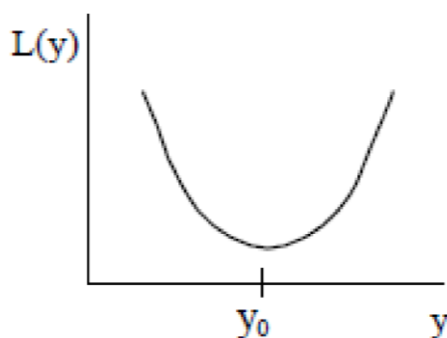
$Y$  – valor apresentado pelo produto, para a característica sob observação

$K$  – constante de proporcionalidade

$Y_o$  – valor-alvo (ideal).

Ou, esquematicamente, pode ser representada pela figura 8.

Figura 20 – Representação esquemática da função-perda vs propriedade.



Fonte: O autor.

Pode-se observar que quanto maior a diferença entre o valor obtido e o ideal, maior o valor da função-perda. Então um dos objetivos no Método Taguchi é minimizar ao máximo a função-perda.

A partir da função-perda, Taguchi deduziu as razões S/N, as quais são explicadas no tópico 3.6.2.

### 3.7.2 Razão *Signal-to-noise* (S/N)

O Método Taguchi usa as razões S/N (*Signal-to-noise*) para identificar as características de qualidade aplicada aos problemas de projeto de engenharia. A função-perda de Taguchi e as razões *Signal-to-noise* (S/N) são elementos críticos no procedimento de otimização através do método Taguchi. A razão S/N é uma medida de performance, que serve para escolher os níveis dos fatores que melhor se comportam com o ruído. Esta razão depende da média e da variabilidade.

Ruído é qualquer variação no desempenho de um produto ou processo. Através do ruído se estima os melhores parâmetros a serem utilizados.

Segundo Taguchi, há três tipos de ruídos: ruídos externos, internos e peça-a-peça. Ruídos externos são causados por variáveis ambientais ou condições de uso que perturbam as funções do produto ou processo, tais como temperatura, pressão, umidade etc. Ruídos internos, por sua vez, são mudanças que ocorrem como resultado de desgaste pelo uso, como distorções das dimensões, trincas, etc. Por fim ruídos peça-a-peça são variações entre produtos produzidos/fabricados de acordo com as mesmas especificações. Então, ao se maximizar as razões S/N, obtêm-se a minimização das funções-perda, assim como de alguns ruídos.

São definidas essencialmente 3 formas de razão *Signal-to-noise* (S/N) [60]:

1. *Smaller-the-better* (Quanto menor, melhor)
2. *Larger-the-better* (Quanto maior, melhor)
3. *Nominal-the-better* (Quanto mais nominal, melhor)

Abaixo são demonstradas as fórmulas de cada uma delas, assim como alguns usos para cada uma:

Equação 2 – Razão S/N *Smaller-the-better*.

$$\eta = -10 \times \log \left( \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^y Y_i^2 \right)$$

Equação 3 – Razão S/N *Larger-the-better*.

$$\eta = -10 \times \log \left( \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^y \frac{1}{Y_i^2} \right)$$

Equação 4 – Razão S/N *Nominal-the-better*.

$$\eta = -10 \times \log \left[ \frac{1}{1-r} \times \sum_{i=1}^y (Y_i - Y) \right]$$

Onde,

$\eta$   $\eta$  = Transformação sinal – de – ruído, e para todas as situações, quanto maior melhor.

$r$   $r$  = Número de combinações de observações da matriz externa, usada em cada combinação da matriz interna.

$Y_i$  = i-ésima resposta observada para cada combinação duma matriz interna  
 $\bar{Y}$  = Média das respostas observadas para cada combinação duma matriz interna

A razão S/N *Smaller-the-better* é usada quando as variáveis de resposta não possuem valores negativos, sendo que quanto mais o valor de Y se afasta de zero, pior a performance do produto e maior o custo. Quanto menor o valor da função perda, melhor, sendo  $L(y) = 0$  o valor ideal. É comumente utilizada para defeitos, a fim de minimizá-los. Exemplos: fuga de radiação no micro-ondas, defeitos numa imagem, quantidade de peças defeituosas por hora, vibração na coluna de direção de veículos, poluição causada por exaustores, corrosão em materiais etc.

A razão S/N *Larger-the-better*, por sua vez, é utilizada quando quanto maiores os valores das variáveis de resposta, melhor. É muito aplicada quando se deseja melhorar as propriedades do produto ou material. Alguns exemplos onde ela pode ser aplicada são: força de aderência, resistência de uma junta soldada, capacidade de tração de um pneu, número de quilômetros (rendimento) feitos com 1 litro de combustível, resistência à tração e ao impacto de um componente, etc.

Por fim, a razão S/N *Nominal-the-better* é aplicada quando qualquer desvio resulta numa queda da qualidade do produto, não importando se o desvio é para cima ou para baixo. Como exemplo, podem ser citados: controle do fluxo de aerossol de uma lata de spray, torneamento de cilindro, controle do diâmetro de um filamento de lâmpada, controle da viscosidade de óleos etc., sendo comumente utilizada no controle dimensional de peças.

Independentemente do tipo de razão S/N utilizada, quanto maior o seu valor melhor o resultado obtido. Outro detalhe que afeta o valor da razão S/N é a variância da propriedade; menores variações aumentam o valor S/N.

### 3.7.3 Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments* - DOE)

Um experimento é basicamente um teste ou uma série de testes, sendo que a validação das conclusões obtidas a partir dos experimentos é bastante dependente de como os experimentos são conduzidos. Portanto, o

planejamento dos experimentos (do inglês, *Design of Experiments*, ou DOE) tem uma importância vital na solução do problema que motivou o experimento em si. Existem diversas formas de planejar os experimentos, tais como fatorial pleno, superfície de resposta e próprio Método Taguchi, só citando alguns dos comumente encontrados na literatura [72-74, 77].

A escolha do DOE é um ponto crucial ao se tentar resolver um problema proposto, devendo ser escolhido cuidadosamente, no intuito de que os dados obtidos possam ser considerados confiáveis. A técnica do DOE foi inicialmente desenvolvida e apresentada por Fisher (anos 20, Inglaterra), em investigação agrícola, para testar a influência de fatores como a chuva e a composição orgânica do solo no rendimento das colheitas. Com o apoio da análise de variância (ANAVA), é possível estimar a significância dos efeitos de cada um dos referidos fatores.

Em DOE, varia-se os níveis dos fatores simultaneamente e observa-se as correspondentes alterações na variável-resposta (como uma propriedade ou o número de defeitos, por exemplo). Esta técnica de planejamento de experimentos facilita o estudo do funcionamento dos sistemas, quando se desconhece as relações funcionais entre as variáveis de resposta (ou de saída) e as variáveis de entrada (fatores) representativas do sistema: se ocorrer a impossibilidade de efetuar o modelamento teórico, é possível analisar empiricamente o efeito que os fatores produzem na resposta, ao assumirem determinados níveis.

A experiência em que se estuda o efeito da variação simultânea de fatores múltiplos é denominada fatorial pleno. O planejamento dos experimentos (DOE) é elaborado na forma de matrizes: cada coluna corresponde um fator e cada linha, uma combinação única de níveis dos fatores que estão sendo avaliados. O fatorial pleno é uma das ferramentas que podem ser utilizadas, no qual os experimentos se baseiam na combinação de todos os níveis dos fatores que estão sendo estudados.

O número total de experimentos que serão realizados, portanto, depende do número de fatores e do número de níveis de cada fator. Considerando que todos os fatores têm a mesma quantidade de níveis, o número total de experimentos pode ser definido por:

$N = L^F$ , onde N é o número de experimentos possíveis, L é o número de níveis de cada fator e F é o número de fatores no estudo. O fatorial pleno, portanto, é uma ferramenta muito útil e simples de se utilizar sendo de grande facilidade para ser determinado. Mas essa ferramenta tem uma limitação: se há um grande número de níveis e/ou fatores para serem estudados, o fatorial pleno se torna inviável ou muito custoso. Por exemplo, na otimização dos parâmetros da moldagem por injeção há inúmeras variáveis, as quais devem ser escolhidas cuidadosamente, a fim de se obter um produto com as propriedades e custos de produção adequados.

Por exemplo, no presente trabalho será estudada a influência de quatro parâmetros distintos (temperatura do molde, temperatura do fundido, pressão de compactação e velocidade de injeção) nas propriedades mecânicas do ABS, sendo que cada um desses parâmetros, há uma variação total de três níveis para cada parâmetro/fator estudado. Para se fazer um planejamento fatorial pleno desse trabalho, seria necessário que fosse usado um fatorial do tipo  $3^4$ , que geraria um total de 81 experimentos distintos. Essa quantidade de experimentos é muito grande, tanto em tempo quanto em custo de materiais e ensaios, tornando a aplicação do fatorial pleno impraticável.

O Método de Taguchi Ortogonal é uma ferramenta de planejamento de experimentos que tem uma grande vantagem, tornando estudos com grande quantidade de fatores e/ou níveis possíveis de serem executados, obtendo-se geralmente, resultados com grande confiabilidade. Em comparação ao fatorial pleno, o método Taguchi Ortogonal, com a mesma configuração citada anteriormente (quatro fatores, com três níveis cada), geraria uma redução de 81 para apenas 9 experimentos. E essa diferença na quantidade de experimentos aumenta cada vez mais, conforme aumenta a quantidade de fatores e/ou níveis.

Por fim, o método de DOE (fatorial pleno, Taguchi Ortogonal ou Taguchi Não-Ortogonal) a ser utilizado depende de dois fatores importantes: custo e precisão. Se o custo não é um problema (há tempo suficiente e os experimentos são baratos e não levam muito tempo), ou uma grande precisão dos resultados é necessária ou é um fator crítico, de preferência deve-se usar fatorial pleno. Se o custo (incluindo tempo) de um fatorial pleno é alto e a

precisão necessária não é um fator tão crítico, um planejamento Taguchi Ortogonal é mais indicado. Finalmente, se o custo é proibitivo (os experimentos são muito caros ou demandam muito tempo) e é possível aceitar precisão limitada, pode-se usar um Taguchi Não-Ortogonal.

### 3.7.4 Análise de Variância (ANAVA)

A Análise de Variância, também conhecida por sua sigla ANAVA ou ANOVA (em inglês) é uma ferramenta complementar, bastante utilizada no Método Taguchi. A partir dessa ferramenta é possível entender a influência de cada um dos fatores ou parâmetros escolhidos, podendo assim visualizar se determinado fator é importante ou não para determinada variável de resposta.

Após a realização do conjunto de experiências selecionadas, Taguchi propõe que se analise estatisticamente os resultados, com um emprego do ANAVA, em duas etapas distintas:

A. Submeter ao ANAVA os valores de *Signal-to-noise* (*S/N*), calculados a partir das variáveis de resposta, no intuito de identificar quais os fatores de controle ou parâmetros que possuam significativa influência.

B. Submeter as médias das respostas do conjunto de experiências ao ANAVA, para identificar os fatores que apresentem uma relação linear com a resposta.

O motivo principal é de empregar os fatores de controle nos respectivos níveis, de forma que minimizem a variabilidade da variável de resposta e tirar proveito da relação linear entre o fator-sinal (aquele que afeta em menor grau a variabilidade) e a resposta, empregando-o no nível que ajuste a resposta ao valor alvo (caso haja um).

A contribuição percentual de variância é determinada através das seguintes equações 5,6 e 7.

Equação 5 – Cálculo da soma dos desvios quadráticos.

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2$$

Onde:

$\eta_i$  = Razão S/N

$\eta_m$  = Razão S/N média

$n$  = número de testes

$SS_T$  = Soma total dos desvios quadráticos

$SS_T$  também pode ser expresso por:

Equação 6 – Cálculo da soma dos desvios quadráticos II.

$$SS_T = SS_M \times (SS_A + SS_B + SS_C + \dots) + SS_E$$

Onde  $SS_E$  é a soma do erro quadrático.

O termo  $SS_M$  pode ser descrito pela equação abaixo:

Equação 7 – Soma dos desvios quadráticos III.

$$SS_T(SS_B, SS_C, \dots) = \sum_{i=1}^{kA} n_{Ai} \times (\eta_{Ai} - \eta_m)^2$$

Onde:

$kA$  = número do nível do fator A

$n_{Ai}$  = número do experimento no nível  $i$  para o fator A

$\eta_{Ai}$  = razão S/N no nível  $i$  para o fator A

### 3.8 PROCEDIMENTOS PARA OTIMIZAÇÃO DE PARAMETROS

Nesse tópico serão mostradas as etapas genéricas para se fazer a otimização do método Taguchi [72-74].

1. Estabelecer o problema a ser solucionado. É necessária uma compreensão clara do problema do projeto, para que o mesmo possa ser estruturado adequadamente. O problema deve ser especificado, e se múltiplas respostas estiverem envolvidas, devem ser consideradas.

2. Determinar o objetivo do projeto. Isto inclui a identificação das características de desempenho, tais como propriedades mecânicas e defeitos (que, de preferência, possam ser medidas ou mensuradas) e o nível de desempenho exigido quando o projeto estiver concluído, isto é, a meta de melhoria deve ser definida, caso haja alguma.

3. Determinar o(s) método(s) de medição. O sistema de medição pode exigir uma ou mais experiências em separado, no intuito de melhorar a precisão das medições. Nessa etapa são definidas, por exemplo, quais ensaios devem ser realizados e que propriedades deseja-se obter a partir desses ensaios.

4. Identificar com base em revisão de literatura os fatores que se supõe que exercem influência sobre as características de desempenho.

5. Dividir os fatores em fatores de controle e de ruído. Fatores de controle são aqueles que podem ser controlados com relativa precisão. Neste trabalho (e em muitos outros que já foram citados), são os parâmetros de processo. Por sua vez, os fatores de ruído não podem ser controlados totalmente, os quais podem interferir em maior ou menor grau, tais como temperatura ambiente, pressão, umidade etc. Os fatores de ruído devem ser minimizados ao máximo, a fim de se obter confiabilidade e precisão dos resultados obtidos.

6. Determinar o número de níveis para todos os fatores. Os graus de liberdade exigidos são uma função direta no número de níveis dos fatores. Para um planejamento inicial, o número de níveis deve manter-se baixo, assim é possível definir as melhores faixas de valores. A literatura (artigos, especificações técnicas, teses, etc.) pode fornecer uma base/ideia, assim como pode-se definir através de testes preliminares.

7. Identificar os fatores de controle que possam interagir. Estas interações também usam graus de liberdade e são determinantes para o tamanho da matriz de experimentos.
8. Traçar o gráfico linear exigido para fatores de controle e interações. Os fatores e interações desejados podem exercer influência sobre a matriz ortogonal selecionada.
9. Selecionar as matrizes ortogonais a serem utilizadas.
10. Atribuir fatores e interações às colunas. O gráfico linear de uma matriz ortogonal deve sofrer modificações a fim de se ajustar à forma exigida. O número de níveis numa coluna também pode ser modificado nesta etapa. Ambas as matrizes, internas e externas, possuirão as mesmas condições de atribuição; no entanto, a matriz externa não deve ser tão complexa quanto a matriz interna, pois a externa é apenas ruído, que é controlado somente na experiência.
11. Executar o conjunto de experimentos. Estratégias de aleatorização devem ser consideradas neste caso.
12. Analisar os dados. Diversos métodos podem ser utilizados para analisar os dados: método de observação, método de classificação, método dos efeitos da coluna, ANAVA, ANAVA S/R, gráficos da média, gráficos da interação etc. Se o projeto sofreu desequilíbrio em decorrência de um erro, a análise dos dados deverá levar isto em consideração ou o ensaio deverá ser executado novamente, para que o erro seja reparado.

13. Interpretar os resultados. Determine quais os fatores que exercem influência e os que não exercem influência na característica principal de desempenho.

14. Selecionar os níveis ótimos dos fatores de controle que mais influenciam, fazendo-se uma previsão dos resultados esperados. Os fatores influentes são somente os que necessariamente possuem o nível determinado ou controlado. Os fatores não influentes devem ser estabelecidos a um nível de custo mínimo.

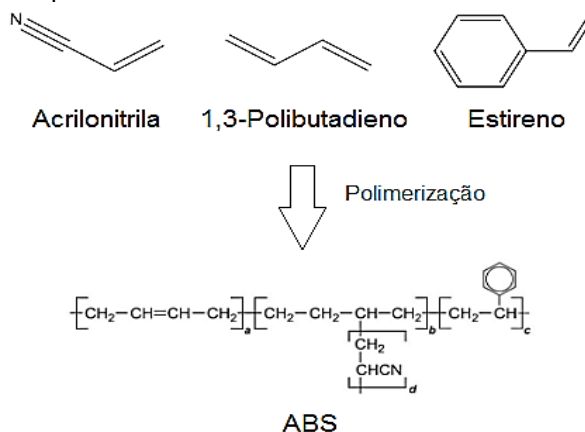
15. Executar experimentos de confirmação. Isto demonstra que os fatores e níveis selecionados para os fatores influentes realmente proporcionam os resultados desejados. Os fatores que não apresentam grande influência podem ser estabelecidos, podendo ser minimizados ou maximizados de acordo com as condições. Se os resultados não corresponderem às expectativas, conseqüentemente algum fator importante pode ter sido omitido da experiência e será preciso efetuar novas experiências.

16. Retornar à etapa 4 se o objetivo da experiência não foi alcançado e/ou uma otimização adicional for possível com fatores confirmados.

### 3.9 ACRILONITRILA – BUTADIENO – ESTIRENO (ABS)

O terpolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) é um dos termoplásticos de engenharia com maior grau de aplicabilidade. Consiste em um copolímero de estireno-acrilonitrilo (SAN) enxertado com borracha de polibutadieno. A matriz é composta pelo Acrilonitrila-Estireno (SAN), com o elastômero baseado em Polibutadieno (PB) como fase dispersa desse copolímero. A estrutura química do ABS é apresentada na figura 21.

Figura 21 – Estrutura química básica do ABS e seus monômeros constituintes.



Fonte: O autor.

A morfologia do ABS costuma ser constituída de partículas de polibutadieno dispersas em uma matriz composta Estireno-Acrilonitrila (SAN). Parte do SAN pode estar enxertado (ligado) na borracha, assim como as partículas de borracha podem ter oclusões de SAN, isto é, dentro das partículas de borracha, pode haver presença de SAN [47]. Também há polímeros de ABS com alta quantidade de borracha, podendo chegar até 67 % em massa, que costumam ser utilizados como materiais para tenacificação em blendas poliméricas. Nesses ABS, sua morfologia se apresenta como uma matriz de Polibutadieno e partículas de SAN dipersas na matriz [137-141].

O ABS pode ser fabricado por polimerização em massa ou emulsão, sendo esta última mais utilizada, devido ao maior controle das partículas de borracha e da enxertia com as moléculas de SAN [47]. O ABS pode ser produzido também pela graftização da acrilonitrila e do estireno sobre o Polibutadieno (PB) ou baseado na mistura física ou mecânica de dois copolímeros, com composição química que reproduzem os teores de acrilonitrila, butadieno e estireno, habitual aos plásticos ABS. Esses dois tipos podem ser encontrados comercialmente.

ABS é um dos polímeros usados com maior frequência em equipamentos elétricos e eletrônicos, assim como, em uma vasta gama de aplicações na indústria automobilística, instrumentos de comunicação, entre outras aplicações. A razão de sua versatilidade, ocorre porque tanto suas propriedades, quanto o seu preço é intermediário entre a *commodities* de menor valor (PE, PP, PS etc) e os mais caros plásticos de engenharia de alta

performance (PEEK, LCP) [142-143]. Além dessas razões, o ABS é também um material plástico altamente reciclável, o que torna maior sua viabilidade e importância tecnológica [144].

Os materiais poliméricos mais utilizados em equipamentos eletrônicos incluem Policarbonato (PC), Poliestireno de alto impacto (HIPS), ABS, PC/ABS, PPO (Polióxido de fenileno)/HIPS, além de PVC e PE para isolamento de cabos [145]. Dos materiais citados, o HIPS e ABS são os mais utilizados para dispositivos eletrônicos domésticos [146].

Devido a sua excelente combinação de propriedades e seu custo-benefício, há muitos estudos do ABS, tanto em blendas poliméricas, quanto em compósitos e nanocompósitos. Entre as blendas e compósitos, pode-se citar PC/ABS em telas, devido a resistência ao impacto e ao risco, PBT/ABS, ABS/grafeno, ABS/LCP e ABS/PLA, usada em materiais biodegradáveis [147 - 150].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

No presente trabalho foi utilizado o terpolímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) HI 10, da Styrolution, de índice de fluidez de 5,5g/10 min (220 °C, 10 Kg).

### 4.2 MÉTODOS

O ABS HI 10 foi injetado em diferentes condições, variando-se os parâmetros de injeção pré-determinados, aplicando-se o Método Taguchi Ortogonal, tanto no planejamento da matriz de experimento quanto no tratamento dos resultados propriamente ditos.

#### 4.2.1 Injeção dos Corpos de Prova

O material ABS HI 10, a fim de se reduzir a quantidade de umidade, foi submetido à secagem em estufa por 24 horas à 70 °C, no intuito de reduzir defeitos provenientes da presença de água durante a moldagem por injeção.

Após a secagem, os corpos de prova de tração e impacto foram injetados em injetora Boy 55M seguindo a norma ASTM D 3641 – 14 [151], tendo sido produzidas 20 corpos de prova de tração e 40 de impacto para cada condição de injeção. As dimensões dos corpos de prova seguiram a norma citada anteriormente, com as dimensões apresentadas na figura abaixo.

As condições de injeção foram definidas através do Método de Taguchi, que possui como principal benefício significativa redução na quantidade de experimentos necessários, quando comparado ao fatorial pleno.

As variáveis estudadas foram a temperatura do fundido, velocidade de injeção, pressão de compactação e temperatura do molde em um experimento de Taguchi com 4 variáveis e 3 níveis, obtendo-se 9 condições de injeção, definidas através de experimentação e arranjos ortogonais.

#### 4.2.2 Planejamento dos experimentos

A fim de se definir os valores dos parâmetros a serem estudados, foi utilizada uma matriz Taguchi Ortogonal preliminar, do tipo L4 ( $2^3$ ). A temperatura do molde nestes testes preliminares foi fixada em 55 °C, com rotação da rosca de 100 RPM e tempo de compactação de 15 s. A matriz preliminar é demonstrada na tabela 1.

Tabela 2 – Matriz Taguchi Ortogonal Preliminar.

| Condição | Temperatura do fundido (°C) | Pressão de compactação (bar) | Velocidade de injeção (cm <sup>3</sup> /s) |
|----------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|
| 1        | 200                         | 100                          | 50                                         |
| 2        | 200                         | 200                          | 110                                        |
| 3        | 250                         | 100                          | 110                                        |
| 4        | 250                         | 200                          | 50                                         |

Fonte: O autor.

Foram injetados alguns corpos de prova, a fim de se observar sua qualidade. Corpos de prova injetados a 200 °C apresentaram preenchimento incompleto e quando injetados em 250 °C, apresentaram amarelamento, indicando degradação térmica. A pressão de compactação de 100 bar apresentou um sério defeito: rechupe excessivo. Quanto à pressão de 200 bar e à velocidade de injeção, nenhum problema ou defeito foram observados.

Portanto a temperatura do fundido e a pressão de compactação necessitaram ajustes de seus respectivos valores. Através de experimentos preliminares a faixa de temperatura foi definida entre 210 e 240 °C e a pressão entre 150 e 250 bar. A temperatura do molde, por sua vez, ficou entre 45 e 65 °C.

A tabela 2 apresenta os parâmetros avaliados nesse trabalho e seus respectivos valores. O nível inferior (nível 1) e o superior (nível 3) foram determinados na matriz preliminar e experimentação, enquanto o nível 2 é o valor intermediário, com exceção do caso da temperatura do molde.

Tabela 3 – Parâmetros de injeção e seus respectivos valores.

| Parâmetro                                    | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
|----------------------------------------------|---------|---------|---------|
| A Temperatura do fundido (°C)                | 210     | 225     | 240     |
| B Temperatura do molde (°C)                  | 45      | 55      | 65      |
| C Pressão de compactação (bar)               | 150     | 200     | 250     |
| D Velocidade de injeção (cm <sup>3</sup> /s) | 50      | 80      | 110     |

Fonte: O autor.

Foi observado que em temperaturas abaixo de 210 °C, não havia completo preenchimento do molde, com a peça saindo incompleta na extremidade. Acima de 240 °C havia mudança na coloração da peça, mudando de branco para um verde claro, indicando pelo odor e coloração, que houve degradação térmica do material.

Portanto, pode-se notar que a janela de processamento do ABS HI 10 é bem pequena. A temperatura do molde foi escolhida baseando-se no fato de que o molde deve-se estar entre 30 e 50°C acima da temperatura ambiente para polímeros amorfos. Por fim, a velocidade de injeção abaixo de 50 cm<sup>3</sup>/s deixava o ciclo de injeção lento, mas acima de 110 cm<sup>3</sup>/s provoca graves defeitos superficiais, principalmente linhas de fluxo por todo o corpo de prova.

O perfil de temperatura da rosca da injetora seguiu a ordem apresentada na tabela 3. As temperaturas das diferentes zonas da rosca de injeção foram escolhidas baseando-se na temperatura do fundido ( $T_F$ ) escolhida.

Tabela 4 – Perfil de temperatura da injetora, de acordo com a temperatura do fundido utilizada.

| <b>Zona</b>         | <b>Bico de injeção</b> | <b>Zona 4</b> | <b>Zona 2</b>  | <b>Zona 1</b>  |
|---------------------|------------------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>Temperatura</b>  | ( $T_F + 10$ )         | $T_F$         | ( $T_F - 40$ ) | ( $T_F - 60$ ) |
| <b>Nível 1 (°C)</b> | 220                    | 210           | 170            | 150            |
| <b>Nível 2 (°C)</b> | 235                    | 225           | 185            | 165            |
| <b>Nível 3 (°C)</b> | 250                    | 240           | 200            | 180            |

Fonte: O autor.

A matriz Taguchi escolhida para conduzir os experimentos é apresentada na tabela 4, sendo escolhido um arranjo ortogonal, do tipo L9, isto é, com nove diferentes condições.

Tabela 5 – Matriz de experimentos Taguchi. Cada condição representa um experimento realizado.

| <b>Condição</b> | <b>A</b>                      | <b>B</b>                    | <b>C</b>                      | <b>D</b>                     |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|                 | <b>Temperatura do fundido</b> | <b>Temperatura do molde</b> | <b>Pressão de compactação</b> | <b>Velocidade de injeção</b> |
| <b>A</b>        | 1                             | 1                           | 1                             | 1                            |
| <b>B</b>        | 1                             | 2                           | 2                             | 2                            |
| <b>C</b>        | 1                             | 3                           | 3                             | 3                            |
| <b>D</b>        | 2                             | 1                           | 2                             | 3                            |
| <b>E</b>        | 2                             | 2                           | 3                             | 1                            |
| <b>F</b>        | 2                             | 3                           | 1                             | 2                            |
| <b>G</b>        | 3                             | 1                           | 3                             | 2                            |
| <b>H</b>        | 3                             | 2                           | 1                             | 3                            |
| <b>I</b>        | 3                             | 3                           | 2                             | 1                            |

Fonte: O autor.

Ao injetar a condição A, devido ao ser uma das condições extremas, ou seja, de menores valores dos 4 parâmetros, houve um preenchimento incompleto das peças na extremidade superior (mais distante do ponto de injeção) dos corpos de prova. Ao elevar a pressão de compactação e a velocidade de injeção, o preenchimento defeituoso pôde ser corrigido.

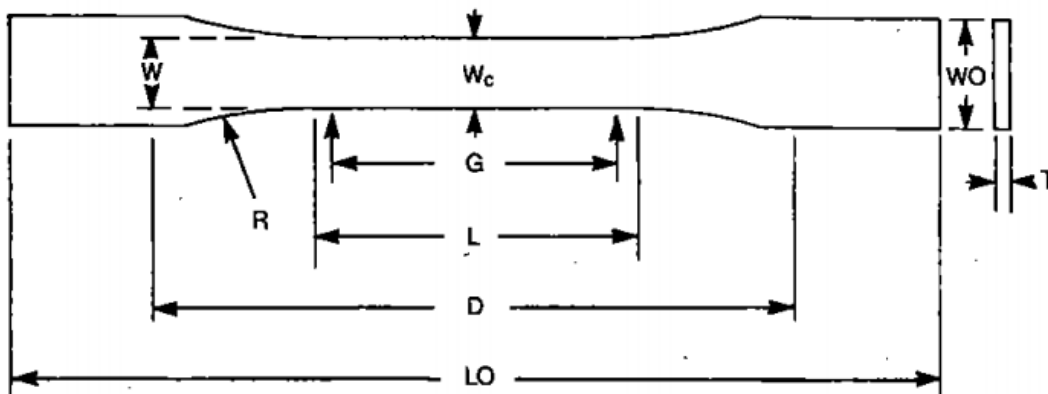
O preenchimento incompleto pode ser associado a três fatores principais. O primeiro é a temperatura do fundido baixa, que influencia a viscosidade do polímero fundido. O segundo fator é a velocidade de injeção que, se insuficiente, promove peças malformadas. O último fator é o índice de fluidez (IF), que é característico de cada material [152].

De qualquer forma, o preenchimento incompleto não impediu os ensaios de tração. Quanto às peças de impacto, nenhum problema foi relatado.

#### 4.2.3 Ensaio de Tração

O ensaio de tração (ASTM D 638) foi realizado em uma máquina de ensaios universal Shimadzu com célula de carga de 10 KN, com uma taxa de deformação constante de 5 mm/min, devido ao comportamento frágil sob tração do ABS, seguindo a mencionada norma ASTM [153]. Para cada condição de injeção foram ensaiados 8 corpos de prova. O corpo de prova utilizado foi o tipo I, possuindo o formato apresentado na figura 22 e as dimensões na tabela 6.

Figura 22 – Corpo de prova do Tipo I, segundo normas ASTM.



Fonte: Adaptado de ASTM D638 [153].

Tabela 6 – Dimensões do corpo de prova de tração utilizado.

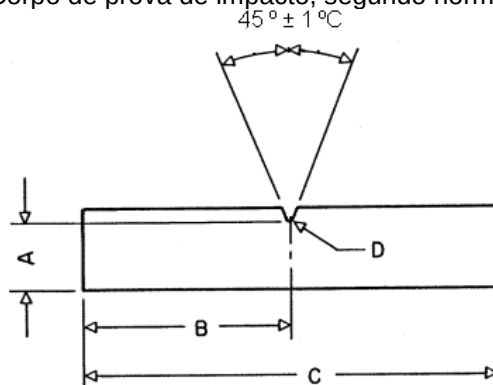
| Dimensão                          | Tamanho (mm) |
|-----------------------------------|--------------|
| Largura da seção estreita (W)     | 13± 0,5      |
| Comprimento da seção estreita (L) | 57± 0,5      |
| Espessura (T)                     | 3,2± 0,4     |
| Largura geral (WO)                | 19± 0,4      |
| Comprimento geral (LO)            | 165          |
| Comprimento (G)                   | 50± 0,25     |
| Distância entre apertos (D)       | 115± 5       |
| Raio de curvatura (R)             | 76± 1        |

Fonte: Adaptado de ASTM D-638 [153].

#### 4.2.4 Ensaio de Impacto Instrumentado

A resistência ao impacto Izod foi determinada em equipamento de impacto instrumentado Zwick/Roell HIT50P, utilizando-se um martelo de impacto de 5,5 J. O ensaio de impacto instrumentado foi realizado de acordo com procedimento A da norma ASTM D 256. Além da energia de impacto, foi feita a análise se diferentes condições de injeção mudam o comportamento de falha ao longo do fenômeno. Para cada condição de injeção foram ensaiados 10 corpos de prova. O corpo de prova é apresentado na figura 23 e suas dimensões na tabela 7.

Figura 23 – Corpo de prova de impacto, segundo norma ASTM D256.



Fonte: Adaptado de ASTM D256 [154].

Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova de impacto.

| Dimensão                      | Tamanho (mm)  |
|-------------------------------|---------------|
| Largura até o entalhe (A)     | 10,16 ± 0,05  |
| Comprimento até o entalhe (B) | 31,80 ± 1,0   |
| Comprimento geral (C)         | 63,50 ± 2,0   |
| Raio da ponta do entalhe (D)  | 0,25 R ± 0,05 |
| Largura geral (E)             | 12,70 ± 0,20  |
| Espessura (T)                 | 4,00          |

Fonte: Adaptado de ASTM D256 [154].

#### 4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada em equipamento Veja 3/TESCAN com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros de injeção na morfologia do ABS, buscando-se a correlação entre comportamento mecânico apresentado pelo material e sua microestrutura. Para tanto, as amostras injetadas foram submetidas à fratura criogênica após imersão em nitrogênio por 45 minutos, tendo sido analisada a região de fratura, após metalização com ouro, para observação dos domínios elastoméricos após o ataque com solução sulfocrômica por 90 segundos a 80 °C.

A solução sulfocrômica foi preparada dissolvendo-se 30 g de dicromato de potássio em 150 ml de água destilada. Em seguida foram adicionados lentamente 500 ml de ácido sulfúrico de pureza analítica, até completa dissolução do dicromato. Essa solução faz um ataque químico seletivo, removendo o butadieno do polímero ABS e preservando os outros dois componentes (estireno e acrilonitrila) do material. O resultado desse ataque, visto através do MEV, é uma matriz de acrilonitrila e estireno, com uma série de orifícios, os quais eram regiões onde estavam o butadieno.

Após ataque com sulfocrômica as amostras foram lavadas com água destilada e submetidas ao ultrassom (Sonics VCX-750) por um tempo de 3 minutos com uma amplitude de 70 %, para promover a limpeza da superfície a ser analisada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e a posterior contagem.

Como ABS é um polímero não condutor, foi realizada metalização com uma fina de camada de ouro na superfície a ser analisada por MEV.

Através do contraste na imagem (regiões do butadieno removido serem buracos escuros), os domínios elastoméricos puderam ser medidos e contados através do software Image J. Usando elétrons retroespalhados (BS - *backscattering*) e ajuste de contraste e brilho, foi possível obter uma melhor visualização da região onde o Polibutadieno estava presente.

#### 4.2.6 Alívio de tensões

Nesse trabalho foi avaliado o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões nas propriedades mecânicas do ABS. O tratamento se baseia num aquecimento controlado e relativamente lento (em torno de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) até determinada temperatura, a fim de reduzir tensões residuais do processo de moldagem por injeção. O ciclo térmico foi composto de aquecimento até a temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , no qual os corpos de prova foram mantidos por 24 horas, seguido de um resfriamento à temperatura ambiente. Após este tratamento térmico, os corpos de prova foram ensaiados mecanicamente sob tração e impacto, conforme procedimentos já descritos.

Há diversos trabalhos na literatura a respeito dos parâmetros tempo e temperatura de alívio de tensões do material ABS. Ozden [155] realizou 2 tipos de alívio de tensões no ABS, que o autor denominou de tratamento médio e tratamento completo. O tratamento médio usou temperatura  $80^{\circ}\text{C}$  por 24 horas e o tratamento completo utilizava de um aquecimento à  $80^{\circ}\text{C}$  por 24 horas seguido de novo aquecimento à  $135^{\circ}\text{C}$  por 12 horas.

Por sua vez, Zhang et al. [156] aplicou um alívio de tensões de curta duração, numa temperatura de  $185^{\circ}\text{C}$  por 1 hora. Kim, Yoon e Xie [157] avaliaram o uso de temperaturas de 215 e  $225^{\circ}\text{C}$  por tempos entre 20 e 85 min. Industrialmente, costuma-se utilizar temperaturas de  $100\text{-}105^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos, com adicional de 15 minutos para cada 0,3 cm de espessura [158].

Como pode-se observar quanto maior a temperatura do alívio de tensões, menor é o tempo requerido naquela temperatura, e vice-versa. Com base nesses trabalhos, foram escolhidos a temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, a fim de avaliar o efeito do tratamento de alívio de tensões nas peças injetadas nesse trabalho, em todas as nove condições.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir das informações sobre orientação molecular e das características do molde utilizado, algumas observações devem ser feitas.

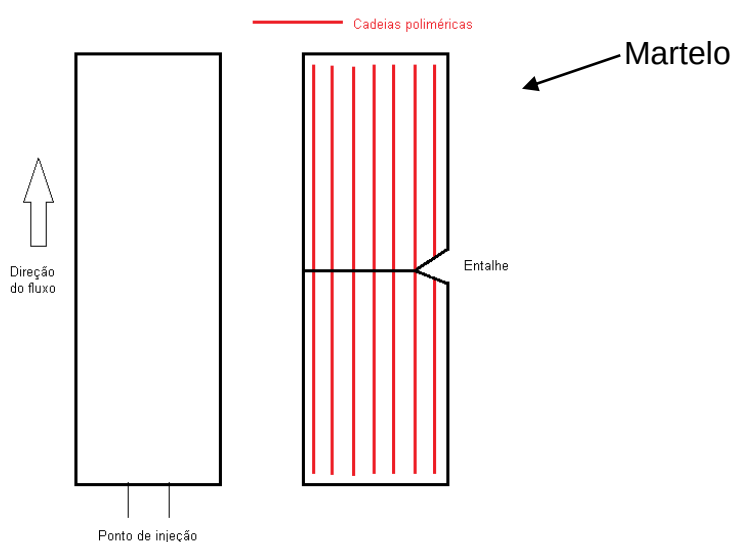
Figura 24 – Corpo de prova de tração utilizado. As linhas vermelhas representam as cadeias poliméricas.



Fonte: O autor.

A orientação molecular também influencia a Resistência ao Impacto (RI) e à tração. Na figura 24 tem-se a representação esquemática de um corpo de prova de tração com orientação molecular. Ressalta-se que esta orientação está ilustrada de forma esquemática e exagerada, não correspondendo ao nível de orientação real, servindo apenas como ilustração da orientação preferencial ao longo do comprimento.

Figura 25 – Corpo de prova de impacto. As linhas vermelhas representam as cadeias poliméricas.



Fonte: O autor.

As ligações dos meros que compõe a cadeia polimérica são mais fortes que as forças de interação entre diferentes cadeias poliméricas. Portanto, é necessária maior energia para uma trinca percorrer uma direção perpendicular às cadeias do que numa direção longitudinal (ao longo das cadeias). Consequentemente a Resistência ao Impacto (RI) é maior na direção perpendicular à orientação do que na direção longitudinal.

Segundo a literatura [4, 21-22], a RI diminui conforme aumenta o grau de orientação. Porém, devido à forma como os corpos de prova foram injetados, tanto a Resistência sob Tração quanto a Resistência ao Impacto apresentarão tendência de aumentar conforme ocorre um aumento do grau de orientação, que por sua vez, depende dos parâmetros de injeção utilizados.

## 5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

A partir do ensaio de tração, foram obtidas as tensões máximas de sob tração, que, no caso do ABS, elas são determinadas na região de transição elástica – plástica, isto é, é designada pela tensão de escoamento. Devido à falta do extensômetro, a deformação foi calculada por uma aproximação matemática, de forma que os valores pudessem ser analisados qualitativamente, através do uso do deslocamento linear das garras da máquina de ensaios universal.

A partir do ensaio de tração, foram obtidos a Resistência sob Tração (no caso do ABS é a Tensão de Escoamento) e o Módulo Elástico ou Módulo de Young, a partir do valor médio das 8 réplicas ensaiadas para cada condição de injeção.

A deformação foi calculada usando a fórmula abaixo:

Equação 8 – Cálculo da deformação.

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0}, \text{ onde:}$$

$\varepsilon$  = deformação (aproximada);

$l$  = distância pontual entre garras;

$l_0$  = comprimento inicial, definido pela distância inicial entre as garras.

A distância entre as garras ficava entre 107,2 e 107,4 mm, dependendo do corpo de prova e da condição de injeção. O módulo Elástico foi determinado

utilizando-se das deformações (de 0,5 e 2,5 %) e as respectivas tensões nesses dois pontos, fazendo-se uso da equação abaixo.

Equação 9 – Determinação do Módulo Elástico ou de Young.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \text{ onde:}$$

E = Módulo Elástico

$\Delta\sigma$  = Variação de tensão

$\Delta\varepsilon$  = Variação de deformação (padronizada em 0,02 ou 2 %)

Os valores médios obtidos de Resistência Máxima sob Tração (RT) e Módulo Elástico (E) são mostrados na tabela 8. O coeficiente de variação é calculado pela razão entre o desvio padrão e o valor médio.

Tabela 8 – Resistência sob Tração (RT) médias para diferentes condições de injeção do ABS HI 10.

| Condição | Tensão Máxima (MPa) | Coeficiente de variação | Módulo Elástico (MPa) | Coeficiente de variação |
|----------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| A        | 32,27 ± 0,52        | 0,018                   | 886,59 ± 77,07        | 0,087                   |
| B        | 34,40 ± 0,33        | 0,007                   | 929,85 ± 92,05        | 0,099                   |
| C        | 33,29 ± 0,27        | 0,008                   | 735,26 ± 141,94       | 0,193                   |
| D        | 34,50 ± 0,43        | 0,012                   | 958,97 ± 37,18        | 0,039                   |
| E        | 32,91 ± 0,41        | 0,012                   | 800,74 ± 54,36        | 0,068                   |
| F        | 34,86 ± 0,45        | 0,013                   | 996,83 ± 102,87       | 0,103                   |
| G        | 33,72 ± 0,75        | 0,022                   | 953,19 ± 69,14        | 0,072                   |
| H        | 33,39 ± 0,27        | 0,008                   | 892,04 ± 87,42        | 0,098                   |
| I        | 34,79 ± 0,13        | 0,004                   | 1006,79 ± 39,38       | 0,039                   |

Fonte: O autor.

Segundo a ficha técnica do ABS HI 10, a sua Resistência sob Tração é de 38 MPa (ISO 527, 23 °C, 50 mm/min) e o Módulo Elástico é de 1900 MPa (ISO 527) [159].

As taxas de deformação usadas nesse trabalho foram de 5 mm/min, devido a característica frágil sob tração. Ao ensaiar com taxas de deformação maiores, há uma tendência de aumentar a Resistência sob Tração, e por isso há essa diferença entre os valores obtidos e o valor da ficha técnica.

Quanto ao Módulo Elástico, é difícil dizer se os valores obtidos nesse estudo são precisos, devido a aproximação matemática feita. Portanto os valores serão apenas usados comparativamente.

Como apresentando acima, as condições que apresentaram os maiores valores da propriedade de Tensão Máxima sob Tração (RT) foram as

condições I ( $T_F=240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=200\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=50\text{ cm}^3/\text{s}$ ) e F ( $T_F=225\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=150\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=80\text{ cm}^3/\text{s}$ ).

A condição A ( $T_F=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=150\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=50\text{ cm}^3/\text{s}$ ) apresentou a pior resistência máxima sob tração. Este fato pode ter ocorrido devido ao preenchimento incompleto das peças injetadas, que por sua vez ocorreu devido às condições “extremas” da injeção, isto é, os menores valores de todos os parâmetros avaliados.

O preenchimento incompleto pôde ser corrigido ao subir apenas a velocidade de injeção de 50 para 110  $\text{cm}^3/\text{s}$  e aumentando a pressão de compactação para 250 bar, mantendo as temperaturas do fundido e do molde sem alterar. Apesar do preenchimento incompleto dos corpos de prova de tração da condição A ser um defeito grave em termos práticos, ele não impediu os ensaios mecânicos de tração.

Apesar de a condição G ( $T_F=240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=250\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=80\text{ cm}^3/\text{s}$ ) ter apresentado valores intermediários de Resistência Máxima sob Tração, sua deformação máxima foi muito pequena quando comparado as outras condições, ou seja, quase não apresenta deformação plástica (fragilização). Na Microscopia Eletrônica de Varredura, o corpo de prova apresentou delaminação e alguns pontos de cisalhamento. Uma das prováveis causas é a diferença entre a temperatura do fundido e do molde ter sido muito elevada (cerca de  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Outro ponto importante é a questão de variação ou desvio padrão. A condição G apresentou a maior variação dos valores de RT, enquanto a condição I apresentou alta estabilidade de seus respectivos valores individuais. De uma forma geral, a RT variou 2,5 MPa entre as condições com maior e menor Resistência sob Tração.

### 5.3 ENSAIO DE IMPACTO INSTRUMENTADO

A partir do ensaio de impacto instrumentado, foram obtidos os valores de Força Máxima durante a fratura (em N) e a Resistência ao Impacto (RI, em J/m), sendo que seus valores médios são apresentados na tabela 5. Os

coeficientes de variação foram calculados da mesma forma que no ensaio de tração; a razão entre desvio padrão e valor médio.

Tabela 9 – Propriedades de Resistência ao Impacto (RI) e Força Máxima médias, para diferentes condições de injeção do ABS HI 10.

| Condição | Força máxima média (N) | Coefficiente de variação | RI média (J/m) | Coefficiente de variação |
|----------|------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|
| A        | 276,76 ± 6,89          | 0,025                    | 334,46 ± 23,90 | 0,071                    |
| B        | 282,47 ± 7,96          | 0,028                    | 361,77 ± 17,65 | 0,049                    |
| C        | 275,87 ± 10,21         | 0,037                    | 360,16 ± 20,84 | 0,058                    |
| D        | 283,57 ± 7,67          | 0,027                    | 355,56 ± 14,72 | 0,041                    |
| E        | 274,74 ± 11,47         | 0,042                    | 352,25 ± 11,40 | 0,032                    |
| F        | 273,58 ± 4,29          | 0,016                    | 352,72 ± 10,57 | 0,030                    |
| G        | 258,99 ± 17,30         | 0,067                    | 295,54 ± 42,68 | 0,144                    |
| H        | 266,49 ± 11,27         | 0,042                    | 328,92 ± 13,75 | 0,042                    |
| I        | 264,72 ± 5,24          | 0,020                    | 332,31 ± 16,04 | 0,048                    |

Fonte: O autor.

Segundo a ficha técnica a RI ao impacto IZod com entalhe é de 360 J/m (ISO 179), o que condiz com os resultados obtidos em algumas condições injetadas [159].

As condições B ( $T_F=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=200\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=80\text{ cm}^3/\text{s}$ ) e D ( $T_F=225\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=200\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=110\text{ cm}^3/\text{s}$ ) apresentaram os maiores valores de Força Máxima das 9 condições de injeção, mas pode-se notar que é um parâmetro que não variou muito com as condições.

Quanto aos valores de Resistência ao Impacto (RI), as melhores condições foram B e C ( $T_F=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=250\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=110\text{ cm}^3/\text{s}$ ).

De uma forma geral, pode-se observar que as condições que usaram os valores mais baixos de temperatura do fundido foram as que obtiveram as melhores propriedades de resistência sob impacto, pois menores temperaturas do fundido tendem a gerar um maior grau de orientação da peça.

A “fragilização” das amostras da condição G, que havia sido observada primeiramente através da deformação máxima das amostras nos ensaios mecânicos de tração foi confirmada através dos ensaios de impacto, onde as amostras da condição G apresentaram as piores propriedades de resistência ao impacto médias mais baixas de todas as 9 condições testadas, tanto em Força Máxima sob Impacto quanto em Resistência ao Impacto (RI). Além disso, o desvio padrão de ambos foram os mais altos de todas as condições. A baixa

RI pode ser associada à sua morfologia peculiar, que apresentou uma série de defeitos, como fibrilação e vazios.

Na tabela 10, são demonstrados os outros parâmetros obtidos a partir do ensaio de impacto instrumentado. Nas colunas 2,3 e 4, temos os dados referentes a região onde ocorre o pico de força máxima. Nas colunas 5,6 e 7 temos as informações sobre o ponto de quebra do corpo de prova.

Tabela 10 – Parâmetros e propriedades médias obtidas no ensaio de impacto instrumentado, para as diferentes condições de injeção.

| Condição | Força Máxima | Deflexão (máximo) | Trabalho (máximo) | Força (quebra) | Deflexão (quebra) | Trabalho (quebra) | Trabalho total | RI     |
|----------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|--------|
| Unidades | N            | mm                | J                 | N              | Mm                | J                 | J              | J/m    |
| A        | 276,77       | 2,89              | 0,43              | 13,84          | 13,37             | 1,33              | 1,34           | 324,46 |
| B        | 282,40       | 3,21              | 0,53              | 14,12          | 13,79             | 1,45              | 1,45           | 361,77 |
| C        | 275,87       | 3,11              | 0,49              | 13,70          | 14,70             | 1,45              | 1,47           | 360,16 |
| D        | 283,54       | 2,95              | 0,46              | 14,18          | 13,30             | 1,42              | 1,42           | 355,86 |
| E        | 274,67       | 3,31              | 0,53              | 13,50          | 12,92             | 1,37              | 1,41           | 352,25 |
| F        | 273,34       | 3,14              | 0,49              | 13,67          | 13,16             | 1,40              | 1,41           | 353,72 |
| G        | 258,99       | 3,06              | 0,47              | 12,95          | 11,24             | 1,15              | 1,18           | 295,54 |
| H        | 266,49       | 3,13              | 0,47              | 13,19          | 12,44             | 1,30              | 1,32           | 328,92 |
| I        | 264,72       | 3,48              | 0,55              | 13,24          | 12,49             | 1,32              | 1,33           | 332,31 |

Fonte: O autor.

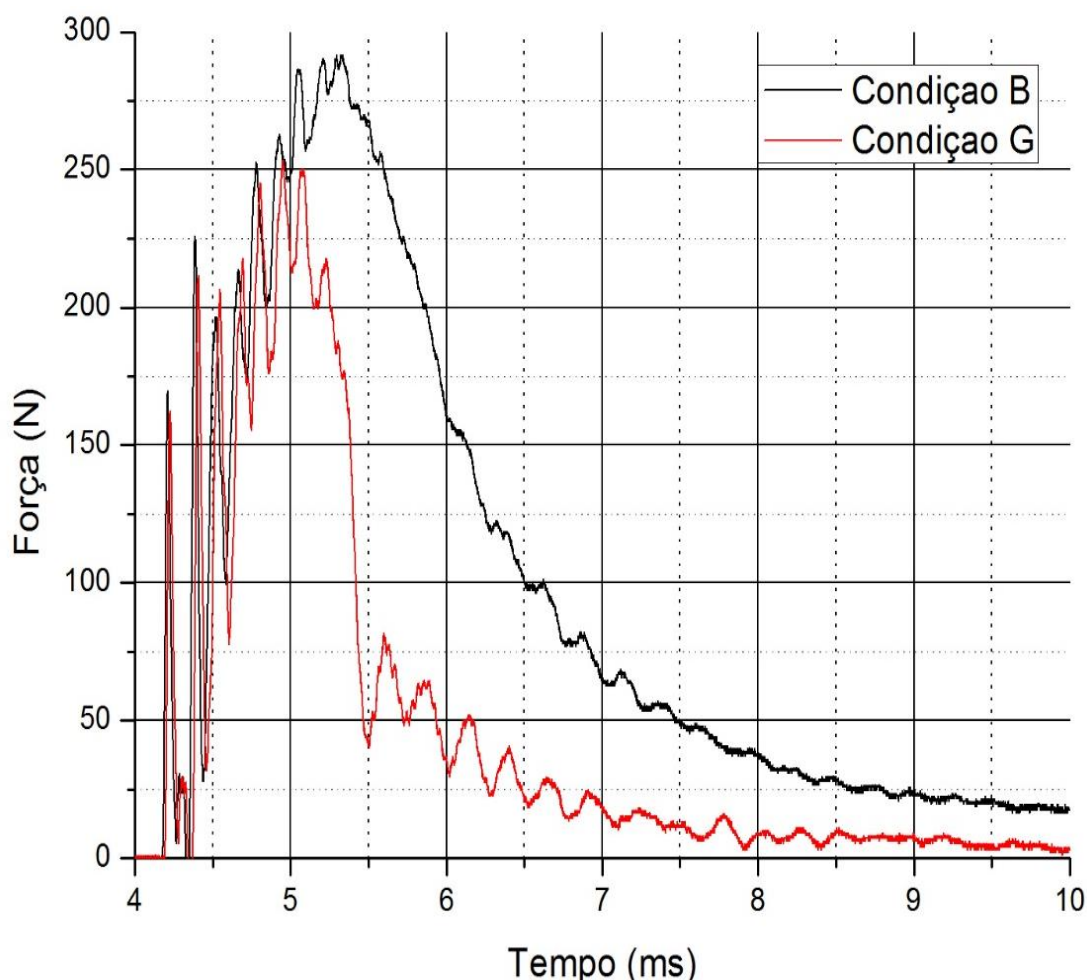
A partir do sensor piezoelétrico no martelo de impacto, podem ser obtidos três dados importantes: tempo, força e distância percorrida pelo martelo. O equipamento foi configurado para determinar esses parâmetros com a frequência de 2 Mhz, isto é, 2.000.000 de pontos por segundo, até o tempo máximo de 50 ms.

O equipamento começa a registrar os dados quando ocorre o contato do martelo no corpo de prova e registra até o tempo de 50 ms após esse contato, gerando cerca de 100.000 pontos no processo.

A partir dos dados de força, tempo e distância, é possível plotar gráficos de força por tempo e força por distância. O gráfico de Força por Tempo foi plotado para amostras da condição B (maior Resistência ao Impacto) e da condição G (menor Resistência ao Impacto)

No gráfico 1, temos o comportamento da força em relação ao tempo. O período considerado foi a partir do início da fratura até ocorrer a quebra do corpo.

Gráfico 1 – Curva de impacto instrumentado Força vs Tempo para amostras das condições de injeção B e G.



Fonte: O autor.

Na região anterior ao ponto de força máxima, entre 4 e 5,5 ms, pode se observar a região onde se apresenta o comportamento elástico-plástico. Após atingir o ponto de força máxima, ocorre a chamada propagação instável.

Na região de propagação instável, fraturas frágeis e dúcteis apresentam comportamentos distintos. Em fraturas frágeis a queda da força se dá de maneira brusca, caindo para valores próximos de zero de forma rápida [160].

Por sua vez, na fratura do tipo dúctil, a força não cai a zero bruscamente, uma vez que a deformação plástica nas vizinhanças da propagação da trinca consome energia continuamente até a fratura completa do corpo de prova.

Observando o gráfico 1, pode-se observar que a fratura do ABS é do tipo dúctil na temperatura ambiente, para as duas condições mostradas [160]. Mas

a queda de força da condição B se deu de forma menos acentuada que a condição G.

Apesar da diferença dos valores de força dos picos, o perfil dos mesmos não apresentou diferença considerável, em nenhuma das 9 condições injetadas

Em polímeros a deformação plástica pode ocorrer através de processos dilatacionais, isto é, com aumento de volume (microfibrilação e cavitação); não dilatacionais, ou seja, com volume constante (escoamento por cisalhamento) ou mesmo através de ambos [161-163].

O tipo de fratura (dúctil, frágil ou dúctil-frágil) também pode ser determinada pelo índice de fragilidade (BI) do material, a partir dos dados obtidos no impacto instrumentado. Ele é calculado através da equação 10.

Equação 10 – Índice de fragilidade (BI).

$$BI = \frac{E_T - E_A}{E_T} \times 100\%, \text{ onde:}$$

BI = Índice de fragilidade

$E_T$  = Energia (trabalho) total para fratura, em J.

$E_A$  = Energia (trabalho) de ativação da trinca. É dada pela energia (trabalho) até o pico de força máxima, em J.

Se o índice BI é menor ou igual a 40%, a fratura é do tipo frágil; se BI fica entre 40% e 53%, a fratura é do tipo dúctil-frágil e se BI é maior que 53%, a fratura é do tipo dúctil [160]. Usando as informações da tabela 10, foi calculado o índice de fragilidade (BI) médio para cada condição, apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Índice de fragilidade (BI), para as diferentes condições de injeção.

| Condição | $E_A$ (J) | $E_T$ (J) | BI (%) |
|----------|-----------|-----------|--------|
| A        | 0,43      | 1,33      | 67,82  |
| B        | 0,53      | 1,45      | 63,58  |
| C        | 0,49      | 1,45      | 66,04  |
| D        | 0,46      | 1,42      | 67,49  |
| E        | 0,53      | 1,37      | 60,96  |
| F        | 0,49      | 1,40      | 64,78  |
| G        | 0,47      | 1,15      | 59,60  |
| H        | 0,47      | 1,30      | 63,45  |
| I        | 0,55      | 1,32      | 58,16  |

Fonte: O autor

Em todas as condições, a fratura apresentou um comportamento do tipo dúctil, à temperatura ambiente, constatado pelos valores de Índice de Fragilidade.

#### 5.4 TESTE DE TUKEY

O primeiro passo do estudo estatístico é o teste de Tukey. Esse teste foi proposto por Tukey, o qual também conhecido como teste de Tukey da Diferença Honestamente Significativa (*Honestly Significant Difference* - HSD) ou teste de Tukey da Diferença Totalmente Significativa (*Wholly Significant Difference* - WSD).

É um teste em que, para a família de todas as comparações, duas a duas, a taxa de erro da família dos testes (FWER) é exatamente  $\alpha$  (e o Intervalo de Confiança é exatamente  $1-\alpha$ ). Ele é usado bastante como uma análise complementar do ANAVA, mostrando se, estatisticamente, dois grupos (condições) são semelhantes ou diferentes quanto aos seus valores [164].

Ao se fazer comparações múltiplas dois conceitos são importantes, o intervalo de confiança e diferença entre condições. O Intervalo de Confiança (CI) é um intervalo de valores que inclui o valor verdadeiro do parâmetro estudado. Como padrão, nesse trabalho foi utilizado um Intervalo de Confiança de 95 % para todos os testes estatísticos.

Por sua vez, a diferença significativa estatisticamente é referente à diferenças que são grande o suficientes para que se possa afirmar que é improvável que esse diferença seja devido ao acaso. Em outras palavras, determina se dois grupos apresentam diferença não somente entre os valores médios, visto que é às vezes uma condição pode apresentar uma grande variação de seus valores [164].

Métodos de comparações múltiplas exatos são raros. O teste de Tukey tem sido mostrado analiticamente ótimo. Isto é, se a família consiste em todas comparações duas a duas e o teste de Tukey pode ser usado, ele resultará em intervalos menores que qualquer outro método de comparação múltipla de uma etapa.

Usando o software Minitab 18, foram feitos os testes de Tukey para as quatro propriedades mecânicas: Resistência Máxima sob Tração, Módulo

Elástico, Força Máxima, Resistência ao Impacto, obtendo os seguintes resultados.

#### 5.4.1 Teste de Tukey: Resistência Máxima sob Tração

A partir dos valores experimentais, foram obtidas as médias da RT e o desvio padrão, assim como os intervalos de confiança (CI), cujos valores são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Variação da Resistência sob Tração (RT) do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | Experimento | N | Média (MPa) | Desvio Padrão | CI (95%)       |
|----------|-------------|---|-------------|---------------|----------------|
| A        | 1           | 8 | 32,27       | 0,52          | (31,96; 32,57) |
| B        | 2           | 8 | 34,40       | 0,33          | (34,09; 34,70) |
| C        | 3           | 8 | 33,29       | 0,27          | (32,99; 33,60) |
| D        | 4           | 8 | 34,50       | 0,43          | (34,20; 34,81) |
| E        | 5           | 8 | 32,91       | 0,41          | (32,60; 33,21) |
| F        | 6           | 8 | 34,86       | 0,45          | (34,55; 35,16) |
| G        | 7           | 8 | 33,72       | 0,75          | (33,42; 34,02) |
| H        | 8           | 8 | 33,39       | 0,27          | (33,08; 33,69) |
| I        | 9           | 8 | 34,79       | 0,13          | (34,49; 35,09) |

Fonte: O autor.

A condição I ( $T_F=240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{COMP}=250\text{ bar}$ ;  $V_{INJ}=110\text{ cm}^3/\text{s}$ ) foi a que apresentou o menor desvio padrão, indicando que é uma condição robusta (apresenta baixa variação), segundo Taguchi. A partir da comparação das médias, obteve-se os subconjuntos ou grupos heterogêneos, apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Resistência sob Tração (RT).

| Condição | Experimento | N | Média (MPa) | Grupos |
|----------|-------------|---|-------------|--------|
| F        | 6           | 8 | 34,86       | A      |
| I        | 9           | 8 | 34,79       | A      |
| D        | 4           | 8 | 34,50       | A      |
| B        | 2           | 8 | 34,40       | A B    |
| G        | 7           | 8 | 33,72       | B C    |
| H        | 8           | 8 | 33,39       | C D    |
| C        | 3           | 8 | 33,29       | C D    |
| E        | 5           | 8 | 32,91       | D E    |
| A        | 1           | 8 | 32,27       | E      |

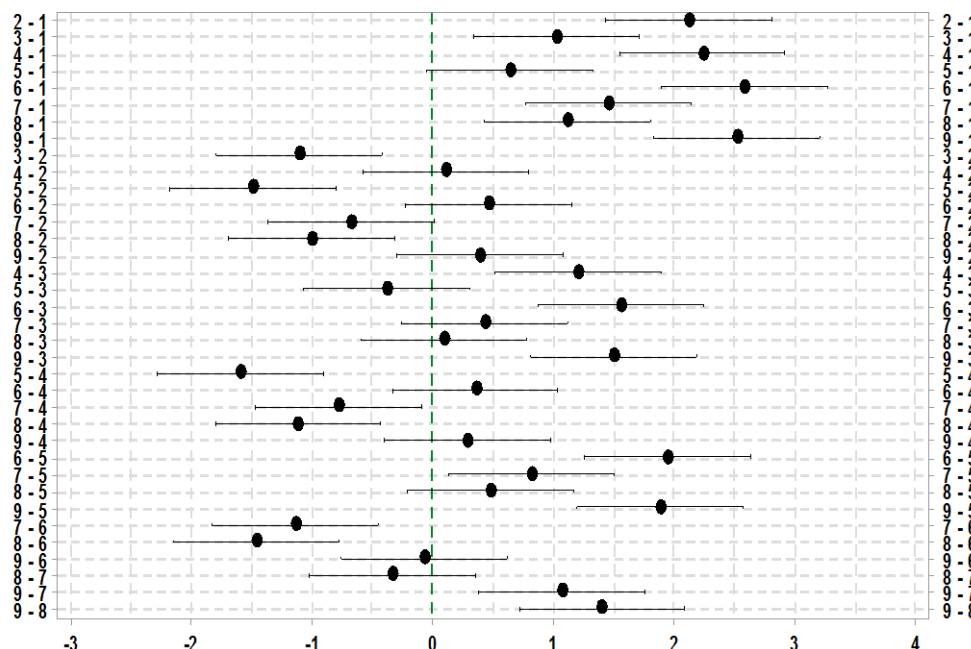
Fonte: O autor.

A Resistência sob Tração apresentou 5 subconjuntos (grupos) distintos, portanto os parâmetros de injeção afetaram bastante essa propriedade.

A partir do Teste de Tukey, foram plotados dois gráficos. O gráfico 2 mostra a diferença das médias para a Resistência Máxima sob Tração (RT). Quando os intervalos que não cruzam o valor “zero”, significa que eles os dois

valores são significativamente diferentes. O gráfico 3, por sua vez mostra os valores individuais e médio de Resistência sob Tração (RT) nas diferentes condições de injeção.

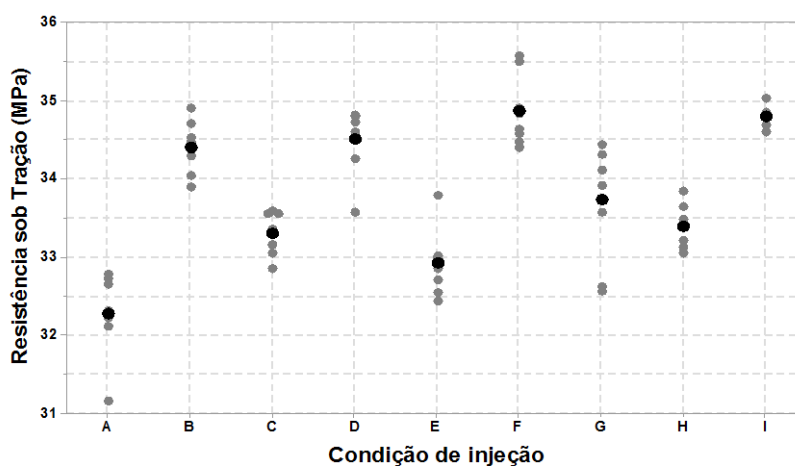
Gráfico 2 – Comparação das médias via Teste de Tukey para a propriedade de Resistência sob Tração (RT).



Nota: Se um intervalo não contiver zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes. Intervalos de Confiança (CI's) de 95 %.

Fonte: O autor.

Gráfico 3 – Valores da Resistência sob Tração (RT) média e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção.



Nota: Pontos pretos são os valores médios e pontos cinzas são os valores individuais.

Fonte: O autor.

#### 5.4.2 Teste de Tukey: Módulo Elástico E

O teste de Tukey foi aplicado aos valores experimentais do Módulo Elástico E, cujos valores são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Variação do Módulo Elástico (E) do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | Experimento | N | Média (N) | Desvio Padrão | CI (95%)        |
|----------|-------------|---|-----------|---------------|-----------------|
| A        | 1           | 8 | 886,6     | 77,07         | (827,3; 945,9)  |
| B        | 2           | 8 | 929,9     | 92,05         | (870,5; 989,2)  |
| C        | 3           | 8 | 735,3     | 141,94        | (675,9; 794,6)  |
| D        | 4           | 8 | 959,0     | 37,18         | (899,6; 1018,3) |
| E        | 5           | 8 | 800,7     | 54,63         | (741,4; 860,1)  |
| F        | 6           | 8 | 996,8     | 102,87        | (937,5; 1056,2) |
| G        | 7           | 8 | 953,2     | 69,14         | (893,9; 1012,5) |
| H        | 8           | 8 | 892,0     | 87,41         | (832,7; 951,4)  |
| I        | 9           | 8 | 1006,8    | 39,38         | (947,5; 1066,1) |

Fonte: O autor.

A partir da comparação das médias, obteve-se os subconjuntos ou grupos heterogêneos, na tabela abaixo.

Tabela 15 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Módulo Elástico (E).

| Condição | Experimento | N | Média (N) | Grupos |
|----------|-------------|---|-----------|--------|
| I        | 9           | 8 | 1006,8    | A      |
| F        | 6           | 8 | 996,8     | A      |
| D        | 4           | 8 | 959,0     | A      |
| G        | 7           | 8 | 953,2     | A      |
| B        | 2           | 8 | 929,9     | A B    |
| H        | 8           | 8 | 892,0     | A B    |
| A        | 1           | 8 | 886,6     | A B    |
| E        | 5           | 8 | 800,7     | B C    |
| C        | 3           | 8 | 735,3     | C      |

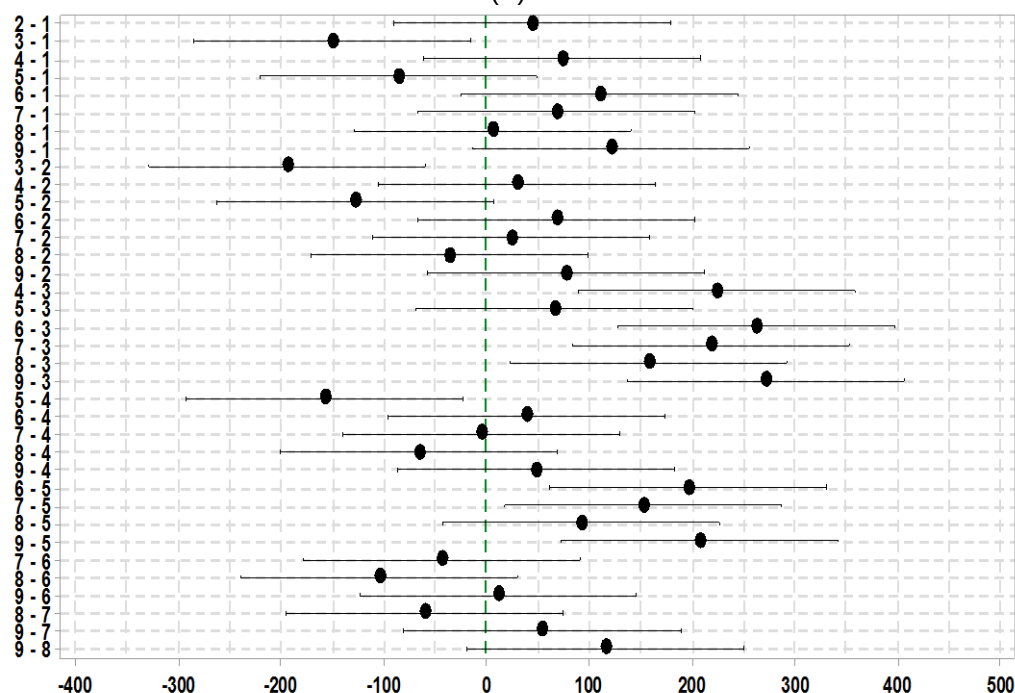
Fonte: O autor.

Comparado ao teste de Tukey aplicado na propriedade de RT, ocorreram menos subconjuntos, sendo que 7 condições são estatisticamente iguais. Outro fato interessante é que as condições que usaram temperatura do fundido de 240 °C, isto é, condições I e F, apresentaram os maiores valores propriedades de Módulo Elástico. Entretanto, a condição C, que também usou temperatura do fundido de 240 apresentou o mais baixo valor.

Como no tópico 5.5.1, são apresentados novamente dois gráficos que foram plotados usados os valores obtidos no teste de Tukey. O gráfico 4 mostra a diferença das médias para a Módulo Elástico E. Quando os intervalos que não cruzam o valor “zero”, significa que os dois valores são substancialmente diferentes. O gráfico 5, por sua vez mostra os valores médios

de em relação às diferentes condições (e seus respectivos intervalos de confiança).

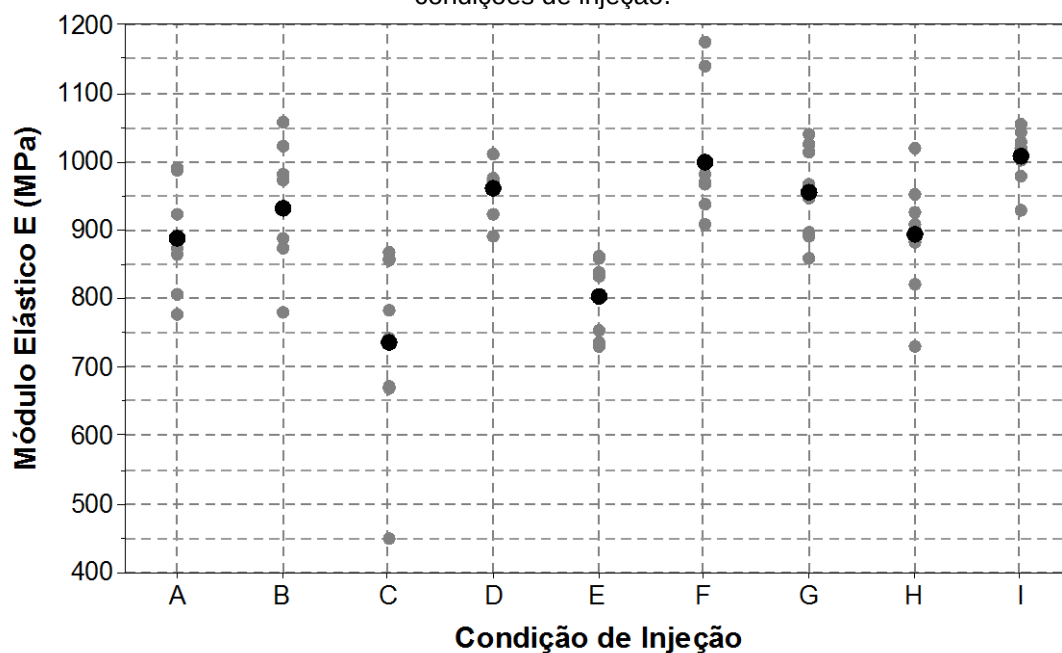
Gráfico 4 – Comparação das médias via Teste de Tukey para a propriedade Módulo Elástico (E).



Nota: Se um intervalo não contiver zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes. Intervalos de confiança (CI's) de 95 %.

Fonte: O autor.

Gráfico 5 – Valores do Módulo Elástico médio e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção.



Nota: Pontos pretos são os valores médios e pontos cinza são os valores individuais. Fonte: O autor.

### 5.4.3 Teste de Tukey: Força Máxima

O mesmo teste foi aplicado aos valores experimentais, os quais foram a partir do ensaio de impacto instrumentado.

Assim como no tópico 5.5.1, obtidas as médias da Força máxima e o desvio padrão, assim como os intervalos de confiança (CI), mostrados abaixo, na tabela 16.

Tabela 16 – Variação da Força Máxima do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | Experimento | N  | Média (N) | Desvio Padrão | CI (95 %)        |
|----------|-------------|----|-----------|---------------|------------------|
| <b>A</b> | 1           | 10 | 276,76    | 6,89          | (270,55; 282,97) |
| <b>B</b> | 2           | 10 | 282,41    | 7,96          | (276,19; 288,62) |
| <b>C</b> | 3           | 10 | 275,78    | 10,21         | (269,66; 282,09) |
| <b>D</b> | 4           | 10 | 283,57    | 7,67          | (277,35; 289,78) |
| <b>E</b> | 5           | 10 | 274,74    | 11,47         | (268,52; 280,95) |
| <b>F</b> | 6           | 10 | 273,34    | 4,29          | (267,13; 279,55) |
| <b>G</b> | 7           | 10 | 258,99    | 17,30         | (252,78; 265,21) |
| <b>H</b> | 8           | 10 | 266,49    | 11,27         | (260,27; 272,70) |
| <b>I</b> | 9           | 10 | 264,72    | 5,24          | (258,51; 270,94) |

Fonte: O autor.

A partir da comparação das médias, obteve-se os subconjuntos ou grupos heterogêneos, na tabela 17. Condições que não compartilham a mesma letra (grupo) são significativamente diferentes quando aos seus valores médios.

Tabela 17 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Força Máxima.

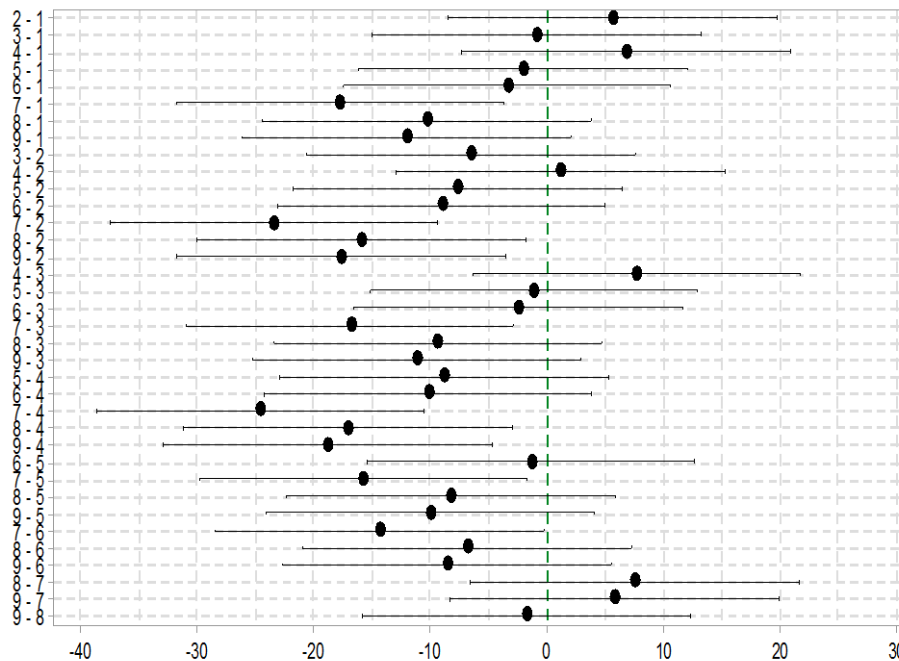
| Condição | Experimento | N  | Média (N) | Grupos |
|----------|-------------|----|-----------|--------|
| <b>D</b> | 4           | 10 | 283,57    | A      |
| <b>B</b> | 2           | 10 | 282,41    | A      |
| <b>A</b> | 1           | 10 | 276,76    | A B    |
| <b>C</b> | 2           | 10 | 275,87    | A B    |
| <b>E</b> | 5           | 10 | 274,74    | A B    |
| <b>F</b> | 6           | 10 | 273,34    | A B    |
| <b>H</b> | 8           | 10 | 266,49    | B C    |
| <b>I</b> | 9           | 10 | 264,72    | B C    |
| <b>G</b> | 7           | 10 | 258,99    | C      |

Fonte: O autor.

Comparado ao teste de Tukey aplicado na propriedade de RT, ocorreram menos subconjuntos, além de haver menor distinção entre as diferentes condições. Outro fato interessante é que as condições que usaram temperatura do fundido de 240 °C, isto é, condições G, H e I, apresentaram os menores valores de Força Máxima sob Impacto, o que pode ser um indicio de que esse valor de temperatura não é indicado para injetar esse material, pelo menos não para esse parâmetro em particular.

O gráfico 6 apresenta a comparação das médias via Teste de Tukey, enquanto o gráfico 7 apresentou os valores médios e individuais, nas diferentes condições de injeção.

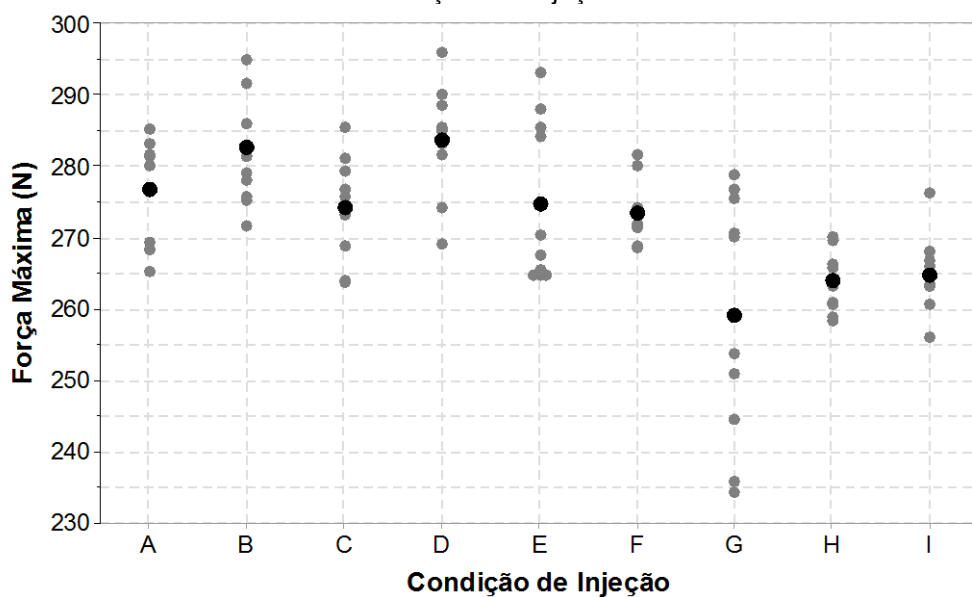
Gráfico 6 – Comparação das médias via Teste de Tukey para o parâmetro Força Máxima.



Nota: Se um intervalo não contiver zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes. Intervalos de Confiança (CI's) de 95%.

Fonte: O autor.

Gráfico 7 – Valores da Força Máxima média e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção.



Nota: Pontos pretos são os valores médios e pontos cinzas são os valores individuais.

Fonte: O autor.

#### 5.4.4 Teste de Tukey: Resistência ao Impacto (RI)

Por fim, o teste de Tukey foi aplicado nos valores de Resistência ao impacto. A partir dos valores experimentais, foram obtidos as médias de RI e o desvio padrão, assim como os intervalos de confiança (CI), mostrados abaixo.

Tabela 18 – Variação da Resistência ao Impacto (RI) do ABS HI-10, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | Experimento | N  | Média (J/m) | Desvio Padrão | CI (95 %)        |
|----------|-------------|----|-------------|---------------|------------------|
| <b>A</b> | 1           | 10 | 334,46      | 23,90         | (321,12; 347,79) |
| <b>B</b> | 2           | 10 | 361,77      | 17,65         | (348,43; 375,10) |
| <b>C</b> | 3           | 10 | 360,16      | 20,84         | (346,83; 373,50) |
| <b>D</b> | 4           | 10 | 355,56      | 14,72         | (342,22; 368,90) |
| <b>E</b> | 5           | 10 | 352,25      | 11,40         | (338,92; 365,59) |
| <b>F</b> | 6           | 10 | 352,72      | 10,57         | (340,39; 367,06) |
| <b>G</b> | 7           | 10 | 295,54      | 42,68         | (282,20; 308,87) |
| <b>H</b> | 8           | 10 | 328,92      | 13,75         | (315,59; 342,26) |
| <b>I</b> | 9           | 10 | 332,31      | 16,04         | (318,98; 345,65) |

Fonte: O autor.

A partir da comparação das médias, obteve-se os subconjuntos ou grupos heterogêneos, como apresentado na tabela 19.

Tabela 19 – Teste de Tukey aplicado para os valores de Resistência ao Impacto (RI).

| Condição | Experimento | N  | Média  | Grupos |
|----------|-------------|----|--------|--------|
| <b>B</b> | 2           | 10 | 361,77 | A      |
| <b>C</b> | 3           | 10 | 360,36 | A      |
| <b>D</b> | 4           | 10 | 355,56 | A B    |
| <b>F</b> | 6           | 10 | 352,72 | A B    |
| <b>E</b> | 5           | 10 | 352,25 | A B    |
| <b>A</b> | 1           | 10 | 334,46 | A B    |
| <b>I</b> | 9           | 10 | 332,31 | A B    |
| <b>H</b> | 8           | 10 | 328,92 | B      |
| <b>G</b> | 7           | 10 | 295,54 | C      |

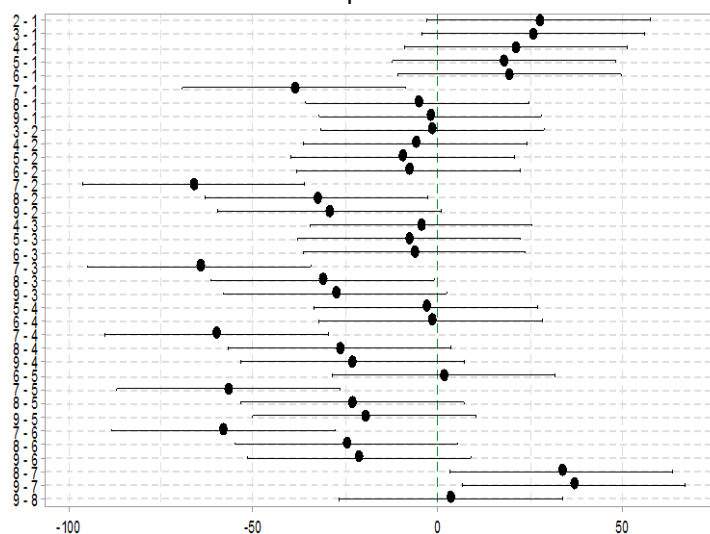
Fonte: O autor.

Condições que não compartilham a mesma letra (grupo) são significativamente diferentes quando aos seus valores médios.

Como pode ser observado, há mais um indicio de que a hipótese levantada no tópico anterior, de que a temperatura de fundido mais alta é prejudicial para as propriedades de impacto. Aqui também houve poucos grupos distintos, indicando que as condições não afetam muito as propriedades de Resistência ao Impacto desse material.

Abaixo são mostrados dois gráficos que foram plotados usando os valores obtidos no teste de Tukey. O gráfico 8 mostra a diferença das médias para a Resistência sob Impacto (RI), enquanto o gráfico 9 os valores médios e individuais nas diferentes condições de injeção.

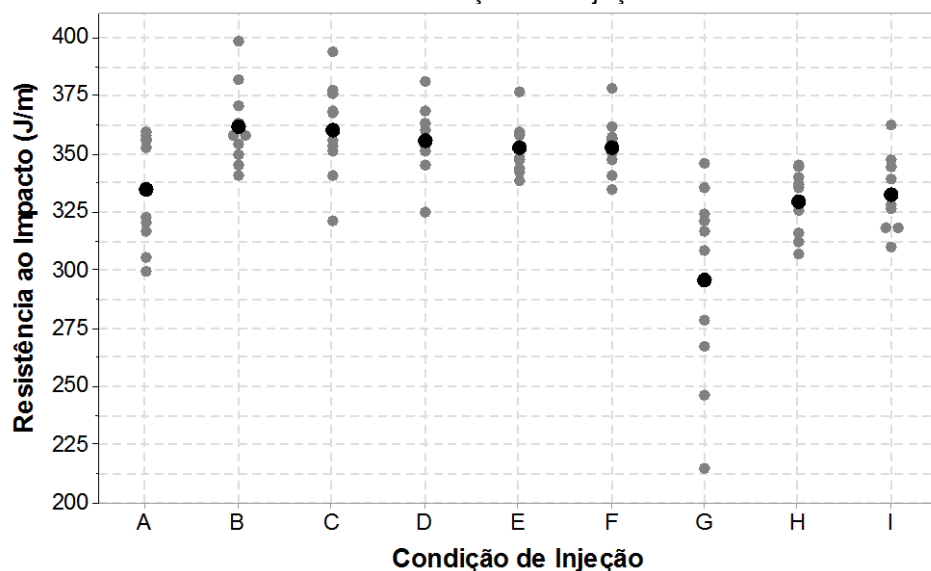
Gráfico 8 – Comparação das médias via Teste de Tukey para a propriedade de Resistência ao Impacto.



Nota: Se um intervalo não contiver zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes. Intervalos de Confiança (CI's) de 95 %.

Fonte: O autor.

Gráfico 9 – Valores de Resistência ao Impacto (RI) média e seus valores individuais, nas diferentes condições de injeção.



Nota: Pontos pretos são os valores médios e pontos cinzas são os valores individuais.

Fonte: O autor.

## 5.5 ANÁLISE DA RAZÃO *SIGNAL-TO-NOISE* (*S/N RATIO*)

Após a obtenção e determinação dos resultados dos ensaios mecânicos de tração e de impacto, o primeiro passo do tratamento estatístico é a determinação das razões *Signal-to-noise* (*S/N ratios*) dos valores de

Resistência Máxima sob Tração (RT), de Força Máxima ( $F_{\max}$ ) e da Resistência ao Impacto (RI).

Considerando que um dos objetivos desse estudo é a otimização das propriedades mecânicas, pode-se concluir que das três formas de calcular a razão S/N é usando a fórmula *Larger-the-better*, a qual foi exposta na revisão bibliográfica (equação 3), mostrada novamente abaixo:

Equação 3 – Razão S/N *Larger-the-better*

$$\eta = -10 \times \log \left( \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^y \frac{1}{y_i^2} \right)$$

Onde:

$\eta$  = razão *Signal-to-noise*;

r = número de testes/réplicas em cada condição

$y_i$  = resultado obtido/medido no teste.

Ela foi usada para as quatro propriedades medidas nos ensaios mecânicos, como demonstrado abaixo, nas tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – Resultados do cálculo da razão *Signal-to-noise* (S/N Ratio), usando a forma *Larger-the-better*, para as propriedades sob tração medidas, nas diferentes condições de injeção.

| Experimento |          | Resistência Máxima sob Tração (RT) |           |       | Módulo Elástico (E) |           |       |
|-------------|----------|------------------------------------|-----------|-------|---------------------|-----------|-------|
| Unidade     |          | MPa (N/mm2)                        |           |       | MPa (N/mm2)         |           |       |
| Experimento | Condição | Resultado                          | S/N médio | S/N   | Resultado           | S/N médio | S/N   |
| 1           | A        | 32,27                              | 30,18     | 30,17 | 886,59              | 58,95     | 58,87 |
| 2           | B        | 34,40                              | 30,73     | 30,73 | 929,85              | 59,37     | 59,25 |
| 3           | C        | 33,29                              | 30,45     | 30,45 | 735,26              | 57,33     | 56,72 |
| 4           | D        | 34,50                              | 30,76     | 30,76 | 958,97              | 59,64     | 59,62 |
| 5           | E        | 32,91                              | 30,35     | 30,34 | 800,74              | 58,07     | 58,01 |
| 6           | F        | 34,86                              | 30,85     | 30,84 | 996,83              | 59,97     | 59,85 |
| 7           | G        | 33,72                              | 30,56     | 30,55 | 953,19              | 59,58     | 59,52 |
| 8           | H        | 33,39                              | 30,47     | 30,47 | 892,04              | 59,01     | 58,89 |
| 9           | I        | 34,79                              | 30,83     | 30,83 | 1006,79             | 60,06     | 60,17 |
| Média       |          | 33,79                              | 30,57     | 30,57 | 906,67              | 59,11     | 58,99 |

Fonte: O autor.

Tabela 21 – Resultados do cálculo da razão *Signal-to-noise* (S/N Ratio), usando a forma *Larger-the-better*, para as propriedades sob tração medidas, nas diferentes condições de injeção.

| Experimento |          | Força Máxima sob Impacto |           |        | Resistência ao impacto (RI) |           |        |
|-------------|----------|--------------------------|-----------|--------|-----------------------------|-----------|--------|
| Unidade     |          | N                        |           |        | J/m                         |           |        |
| Experimento | Condição | Resultado                | S/N médio | S/N    | Resultado                   | S/N médio | S/N    |
| 1           | A        | 276,76                   | 48,842    | 48,842 | 334,46                      | 50,487    | 50,426 |
| 2           | B        | 282,41                   | 49,017    | 49,019 | 361,77                      | 51,169    | 51,142 |
| 3           | C        | 275,87                   | 48,814    | 48,758 | 360,16                      | 51,135    | 51,094 |
| 4           | D        | 283,57                   | 49,053    | 49,053 | 355,56                      | 51,018    | 50,998 |
| 5           | E        | 274,74                   | 48,778    | 48,778 | 352,25                      | 50,937    | 50,925 |
| 6           | F        | 273,58                   | 48,742    | 48,735 | 354,41                      | 50,949    | 50,936 |
| 7           | G        | 258,99                   | 48,266    | 48,266 | 295,54                      | 49,412    | 49,124 |
| 8           | H        | 266,49                   | 48,513    | 48,425 | 328,92                      | 50,342    | 50,321 |
| 9           | I        | 264,72                   | 48,456    | 48,456 | 332,31                      | 50,431    | 50,404 |
| Média       |          | 273,01                   | 48,720    | 48,704 | 341,71                      | 50,653    | 50,597 |

Fonte: O autor.

A partir dos dados obtidos nos ensaios, foi obtido dois valores de *Signal-to-noise*. O S/N médio considera apenas o valor médio da propriedade, o qual é usado pelo software para fazer a predição de propriedades. Por sua vez, o segundo conjunto de valores S/N considera tanto o valor médio da propriedade quanto a sua variação.

Quanto maior a razão S/N, para essas propriedades, devido à formula *Larger-the-better*, maior o valor mensurado e menor é a variação. Essa razão também vai ser muito útil para se determinar quais as melhores condições de injeção, como será visto mais para frente.

## 5.6 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANAVA)

A influência dos parâmetros do processo de injeção nas propriedades mecânicas do ABS HI 10 foi analisado por ANAVA. Essa análise é uma maneira de determinar como os diversos parâmetros da moldagem por injeção afetam as propriedades finais de materiais injetados.

A partir do cálculo das razões S/N e da análise ANAVA, foram obtidos. quais os parâmetros ótimos para obter as melhores propriedades de Resistência sob Tração, Módulo Elástico, Força Máxima e Resistência ao Impacto, assim como a porcentagem de contribuição de cada parâmetro, ou seja, quais parâmetros são mais influentes em cada propriedade.

O Grau de Liberdade (DOF - *Degree of Freedom*) é determinado pelo número de diferentes níveis do parâmetro que está sendo avaliado menos um e a variância (ou quadrado do médio) é calculada pela razão entre soma dos quadrados e o grau de liberdade. Por fim a contribuição percentual, pode ser dada pela razão entre soma dos quadrados ou da variância de cada parâmetro pelo valor de todos os parâmetros somados.

#### 5.6.1 Análise de Variância (ANAVA): Resistência sob Tração (RT)

Para a Resistência Máxima sob Tração (RT), o Método Taguchi, combinado com a ANAVA, obteve os resultados demonstrados na tabela 22.

Tabela 22 – Resultados da Análise de Variância (ANAVA) para a Resistência sob Tração (RT), combinado com o cálculo das razões S/N.

| S/N Médio 30,57        |     |         |              |              |                    |           |        |
|------------------------|-----|---------|--------------|--------------|--------------------|-----------|--------|
| Parâmetro              | DOF | Nível 1 | Nível 2      | Nível 3      | Soma dos quadrados | Variância | P (%)  |
| Temperatura do fundido | 2   | 30,45   | <b>30,65</b> | 30,62        | 1,03               | 0,52      | 15,70  |
| Temperatura do molde   | 2   | 30,50   | 30,52        | <b>30,71</b> | 1,23               | 0,62      | 18,87  |
| Pressão de compactação | 2   | 30,50   | <b>30,77</b> | 30,42        | 3,67               | 1,84      | 56,19  |
| Velocidade de injeção  | 2   | 30,45   | <b>30,71</b> | 30,56        | 0,60               | 0,30      | 9,24   |
| Erro                   | 0   |         |              |              |                    |           |        |
| Total                  | 8   |         |              |              | 6,53               | 3,27      | 100,00 |

Fonte: O autor.

A partir dos valores de S/N, pode-se observar, no caso da propriedade de Resistência sob Tração, foram obtidos os maiores valores de S/N, e conseqüentemente, os maiores de RT, foram para os valores de temperatura do fundido de 225°C, temperatura do molde de 65°C, pressão de compactação de 200 bar e velocidade de injeção de 80 cm<sup>3</sup>/s.

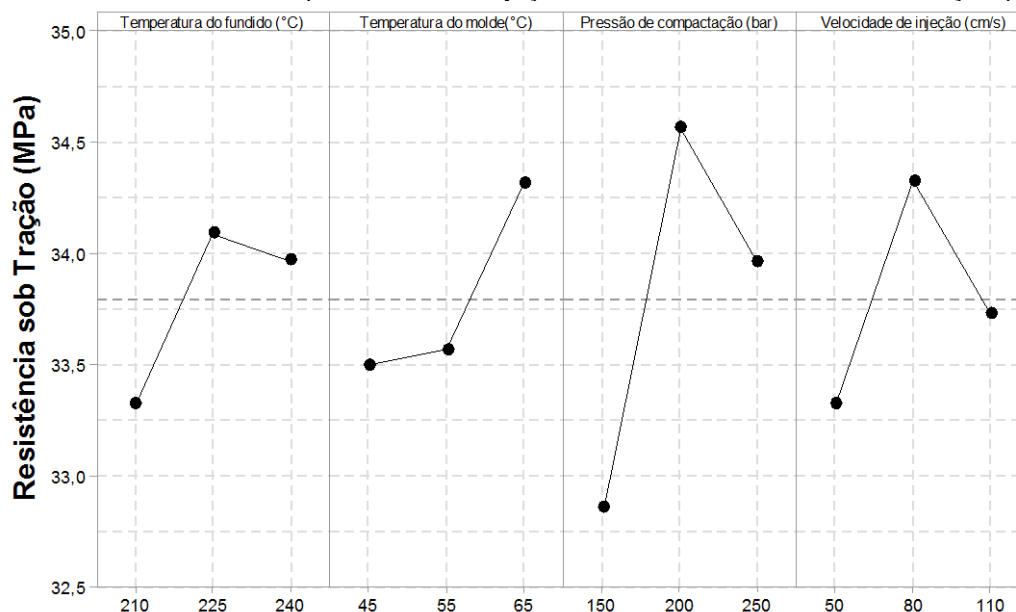
Era esperado que menores temperaturas do fundido e do molde, assim como pressões de compactação e velocidades de injeção maiores promovessem os maiores valores de RT, visto que, promovem maiores graus de orientação em produtos injetados.

Dos 4 parâmetros, a pressão de compactação exerceu a maior influência nessa propriedade mecânica, com uma contribuição de 56,18%. A razão é desconhecida, pois a taxa de preenchimento e a temperatura do fundido são os fatores que mais influenciam o grau de orientação, que, por sua vez exerce efeito direto nas propriedades mecânicas.

A temperatura do molde e do fundido exerceram influência semelhantes. No trabalho de Ozcelik [31], também foi observado que a temperatura do fundido exerce influência maior que a velocidade de injeção.

No gráfico 10 é mostrado o valor de RT, em função de cada parâmetro de injeção separadamente, onde a influência de cada parâmetro fica em evidência.

Gráfico 10 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistência Máxima sob Tração (RT).



Fonte: O autor.

### 5.6.2 Análise de Variância (ANAVA): Módulo Elástico (E)

A partir do ANAVA, foram obtidos os resultados para a Módulo Elástico (E), apresentado na tabela 23.

Tabela 23 – Resultados da Análise de Variância (ANAVA) para a Força Máxima, combinado com o cálculo das razões S/N.

| <b>S/N Médio 59,11</b> |     |              |              |               |                    |           |        |
|------------------------|-----|--------------|--------------|---------------|--------------------|-----------|--------|
| Parâmetro              | DOF | Nível 1      | Nível 2      | Nível 3       | Soma dos quadrados | Variância | P (%)  |
| Temperatura do fundido | 2   | 58,55        | 59,23        | <b>59,550</b> | 15.696             | 7.848     | 24,22  |
| Temperatura do molde   | 2   | <b>59,39</b> | 58,82        | 59,120        | 5.346              | 2.673     | 8,25   |
| Pressão de compactação | 2   | 59,31        | <b>59,69</b> | 58,327        | 29.063             | 14.531    | 44,84  |
| Velocidade de injeção  | 2   | <b>59,03</b> | 56,64        | 58,658        | 14.704             | 7.352     | 22,69  |
| Erro                   | 0   |              |              |               |                    |           |        |
| Total                  | 8   |              |              |               | 64.810             | 32.405    | 100,00 |

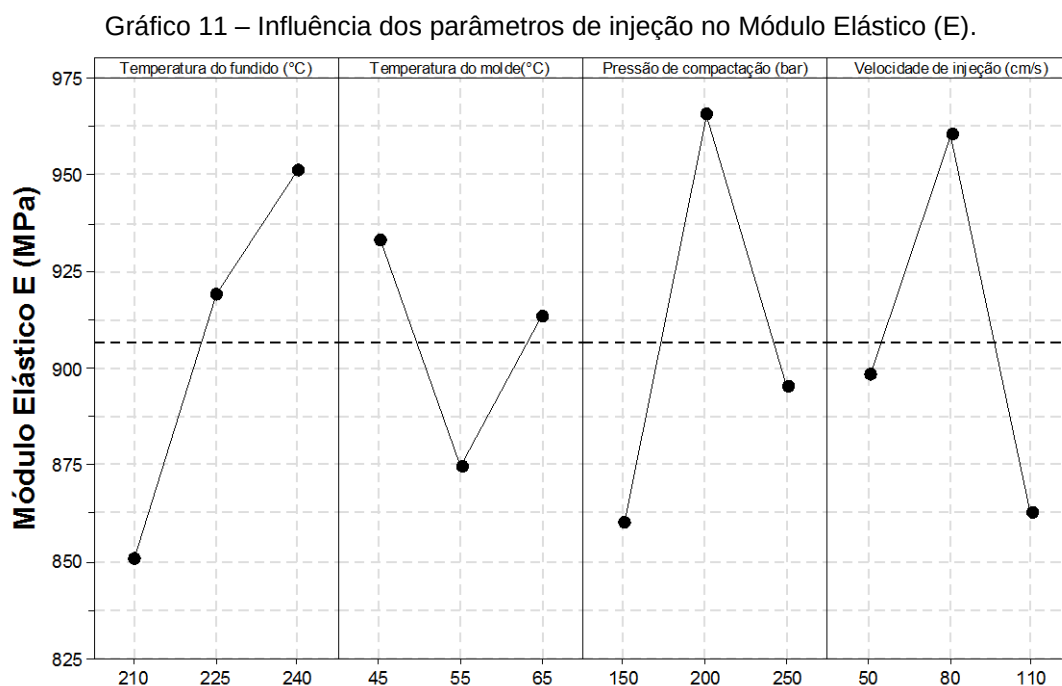
Fonte: O autor.

A partir do cálculo dos valores de S/N, pode-se observar que para a propriedade o Módulo Elástico, foram obtidos os maiores valores de S/N, e consequentemente, os maiores valores de propriedade, para os valores de temperatura do fundido de 240°C, temperatura do molde de 45°C, pressão de compactação de 200 bar e velocidade de injeção de 80 cm<sup>3</sup>/s.

Dos 4 parâmetros, a pressão de compactação exerceu a maior influência nessa propriedade mecânica, com uma contribuição de 44,84%, seguido pela temperatura do fundido (24,22%) e velocidade de injeção (22,69%). A temperatura do molde foi o fator que menos contribuiu na variação do Módulo Elástico.

Em um trabalho semelhante, Ozcelik [31] obteve que a temperatura do fundido foi o mais importante parâmetro, porém a faixa de valores e alguns parâmetros de injeção são diferentes, não podendo ser traçado um paralelo direto.

No gráfico 11 é mostrado o valor de Módulo Elástico (E), em função de cada parâmetro de injeção separadamente, onde a influência de cada parâmetro fica em maior evidência.



Fonte: O autor.

A influência da velocidade de injeção e da pressão de compactação são bastante semelhantes, tanto nos seus valores quanto no perfil de variação da propriedade em questão. Quanto a temperatura do fundido, pôde-se observar a tendência do aumento do Módulo Elástico com a mesma.

### 5.6.3 Análise de Variância (ANAVA): Força Máxima

A partir do ANAVA, combinado com o cálculo das razões S/N, foram obtidos os resultados da influência dos parâmetros estudados para a Força Máxima, apresentado na tabela 24.

Tabela 24 – Resultados da Análise de Variância (ANAVA) para a Força Máxima, combinado com o cálculo das razões S/N.

| S/N Médio 48,72        |     |              |              |              |                    |           |        |
|------------------------|-----|--------------|--------------|--------------|--------------------|-----------|--------|
| Parâmetro              | DOF | Nível 1      | Nível 2      | Nível 3      | Soma dos quadrados | Variância | P (%)  |
| Temperatura do fundido | 2   | <b>48,89</b> | 48,86        | 48,41        | 417,42             | 224,99    | 78,33  |
| Temperatura do molde   | 2   | 48,72        | <b>48,77</b> | 48,65        | 14,93              | 1,02      | 2,80   |
| Pressão de compactação | 2   | 48,70        | <b>48,84</b> | 48,62        | 71,05              | 47,03     | 13,33  |
| Velocidade de injeção  | 2   | 48,69        | 48,67        | <b>48,75</b> | 29,51              | 5,85      | 5,54   |
| Erro                   | 0   |              |              |              |                    |           |        |
| Total                  | 8   |              |              |              | 532,91             | 266,46    | 100,00 |

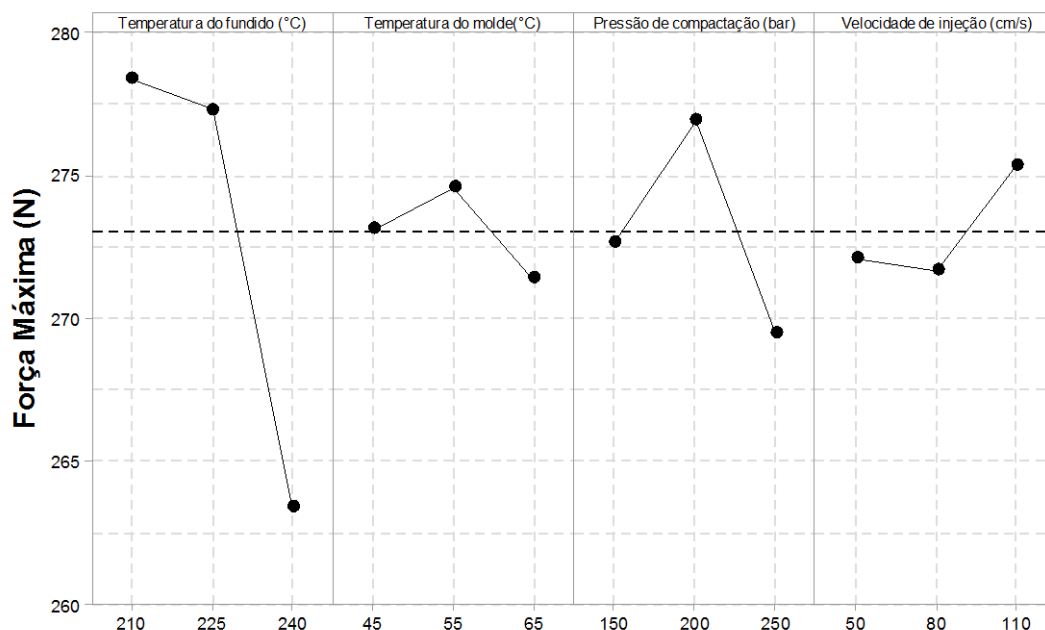
Fonte: O autor.

A partir do cálculo dos valores de S/N, pode-se observar que para a propriedade de Força Máxima, foram obtidos os maiores valores de S/N, e consequentemente, os maiores valores de propriedade, para os valores de temperatura do fundido de 210°C, temperatura do molde de 55°C, pressão de compactação de 200 bar e velocidade de injeção de 110 cm<sup>3</sup>/s.

Dos 4 parâmetros, a temperatura do fundido exerceu a maior parte da influência nessa propriedade mecânica, com uma contribuição de 78,33%, seguido pela pressão de compactação (13,33%). A temperatura do molde e velocidade de injeção não apresentaram grande influência para os valores utilizados.

No gráfico 12 é mostrado o valor de Força Máximas sob Impacto, em função de cada parâmetro de injeção separadamente, onde a influência de cada parâmetro fica em maior evidência.

Gráfico 12 – Influência dos parâmetros de injeção na Força Máxima.



Fonte: O autor.

#### 5.6.4 Análise de Variância (ANOVA): Resistência ao Impacto (RI)

A partir do ANOVA e dos valores das razões S/N, foram obtidos os resultados para a Resistência ao Impacto, apresentados na tabela 25.

Tabela 25 – Resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a Resistência ao Impacto (RI), combinado com o cálculo das razões S/N.

| S/N Médio 50,57         |   |         |              |              |                    |           |        |
|-------------------------|---|---------|--------------|--------------|--------------------|-----------|--------|
| Grau de liberdade (DOF) |   | Nível 1 | Nível 2      | Nível 3      | Soma dos quadrados | Variância | P (%)  |
| Temperatura do fundido  | 2 | 50,93   | <b>50,98</b> | 50,06        | 2341,75            | 1170,88   | 64,28  |
| Temperatura do molde    | 2 | 50,31   | 50,82        | <b>50,85</b> | 785,60             | 392,80    | 21,56  |
| Pressão de compactação  | 2 | 50,61   | <b>50,87</b> | 50,49        | 320,41             | 160,21    | 8,79   |
| Velocidade de injeção   | 2 | 50,62   | 50,52        | <b>50,83</b> | 195,56             | 97,78     | 5,37   |
| Erro                    | 0 |         |              |              |                    |           |        |
| Total                   | 8 |         |              |              | 3643,32            | 1621,66   | 100,00 |

Fonte: O autor.

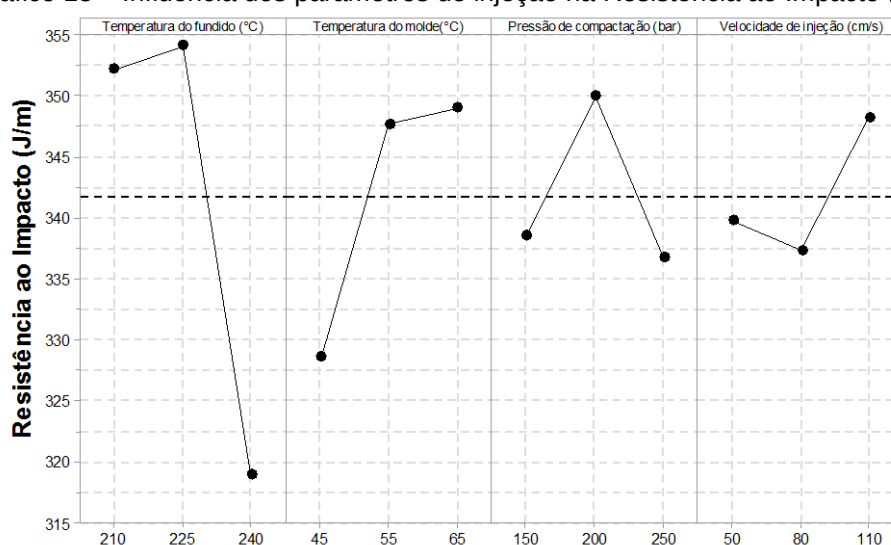
A partir do cálculo dos valores de S/N, pode-se observar que para a propriedade de Força Máxima, foram obtidos os maiores valores de S/N, e conseqüentemente, os maiores valores de propriedade, para os valores de temperatura do fundido de 225°C, temperatura do molde de 65°C, pressão de compactação de 200 bar e velocidade de injeção de 110 cm³/s.

Dos 4 parâmetros, a temperatura do fundido exerceu a maior parte da influência nessa propriedade mecânica como ocorreu na propriedade de Força

Máxima, servindo como indicio de que a temperatura do fundido é um fator importante se tiver como objetivo otimizar as propriedades de Impacto do ABS. A temperatura do fundido apresentou uma contribuição de 64,28%, seguido pela temperatura do molde (21,56 %). O efeito majoritário da temperatura do fundido na RI também foi observado por Ozcelik [31].

No gráfico 13, são demonstrados os valores de Resistência ao Impacto (RI), plotado em função de cada parâmetro de injeção separadamente, onde a influência de cada parâmetro fica em maior evidência.

Gráfico 13 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistência ao Impacto (RI).



Fonte: O autor.

#### 5.6.5 Otimização dos parâmetros

A partir dos valores das razões S/N, podemos simplificar quais as melhores condições de injeção para se obter as melhores propriedades mecânicas em separado, considerando tanto o módulo dos valores quanto sua variação. As condições otimizadas são demonstradas na tabela 26.

A pressão de compactação de 200 bar foi o parâmetro que se repetiu na otimização das 4 propriedades.

Tabela 26 – Condições ótimas de injeção determinadas pela análise de Variância (ANAVA).

| Propriedade                        | Temperatura do fundido (A) |        | Temperatura do Molde (B) |       | Pressão de compactação (C) |         | Velocidade de injeção (D) |                        |
|------------------------------------|----------------------------|--------|--------------------------|-------|----------------------------|---------|---------------------------|------------------------|
| <b>Resistência sob Tração</b>      | A2                         | 225° C | B3                       | 65 °C | C2                         | 200 bar | D2                        | 80 cm <sup>3</sup> /s  |
| <b>Módulo Elástico (E)</b>         | A3                         | 240 C  | B1                       | 45 °C | C2                         | 200 bar | D1                        | 50 cm <sup>3</sup> /s  |
| <b>Força Máxima</b>                | A1                         | 210 °C | B2                       | 55°C  | C2                         | 200 bar | D3                        | 110 cm <sup>3</sup> /s |
| <b>Resistência ao Impacto (RI)</b> | A2                         | 225 °C | B3                       | 65°C  | C2                         | 200 bar | D3                        | 110 cm <sup>3</sup> /s |

Fonte: O autor.

#### 5.6.6 Análise de Variância (ANAVA): Interação entre Parâmetros

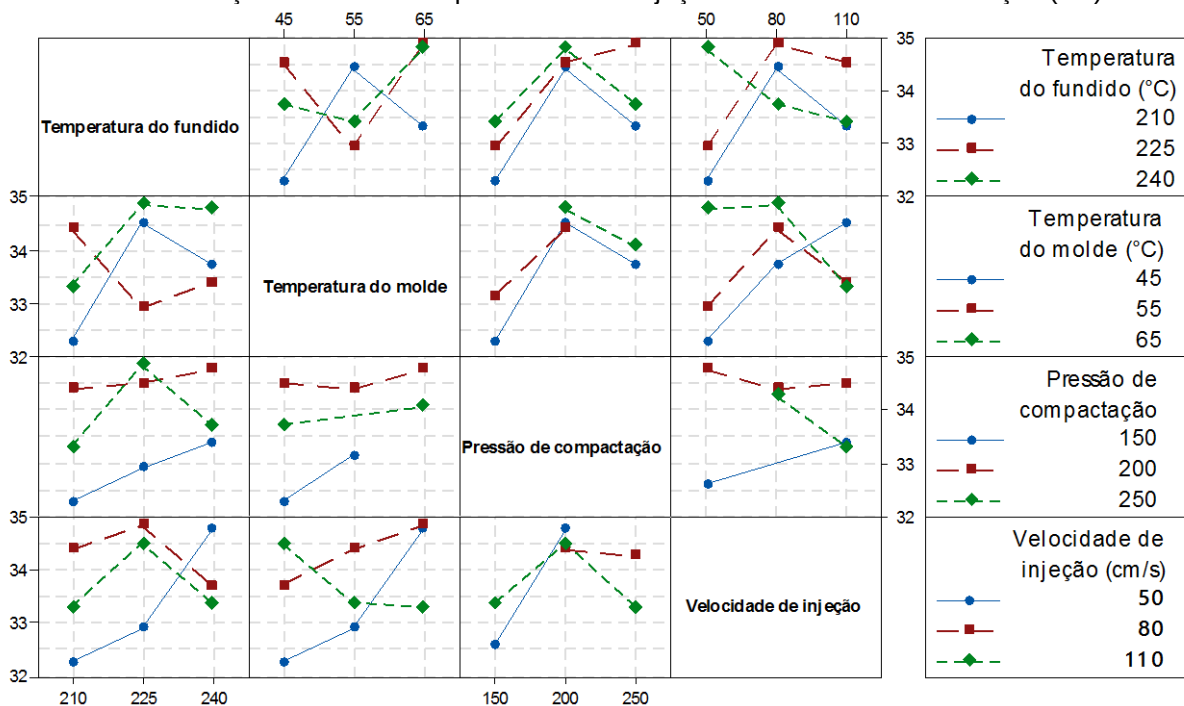
O processo de moldagem por injeção utiliza muitas variáveis de processo, das quais 4 foram estudadas nesse trabalho. Além da influência de cada uma delas isoladamente, as variáveis ou parâmetros do processo interagem entre si, modificando as variáveis de resposta, que são, no caso, as propriedades mecânicas medidas.

Portanto, a partir do ANAVA de cada parâmetro, e através do software Minitab, foi determinada a interação entre os parâmetros e suas conseqüências nas propriedades mecânicas medidas. Essas interações são apresentadas para cada propriedade, nos três gráficos a seguir.

No eixo X temos os 4 parâmetros utilizados. Escolhendo um deles e um nível utilizado (um dos valores), e subindo numa linha paralela ao eixo Y, a uma série de pontos de cruzamento com as retas, que são as interações daquele parâmetro e nível específicos com o segundo parâmetro escolhido. Cada uma das retas representa um nível diferente daquele parâmetro.

A partir dessas informações, pode-se avaliar o comportamento das propriedades com os 2 parâmetros, isto é, se a propriedade aumenta ou diminui com o(s) parâmetros de injeção escolhidos, além de evidenciar qual é o parâmetro mais influente em cada um dos casos.

Gráfico 14 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção na Resistência sob Tração (RT).



Fonte: O autor.

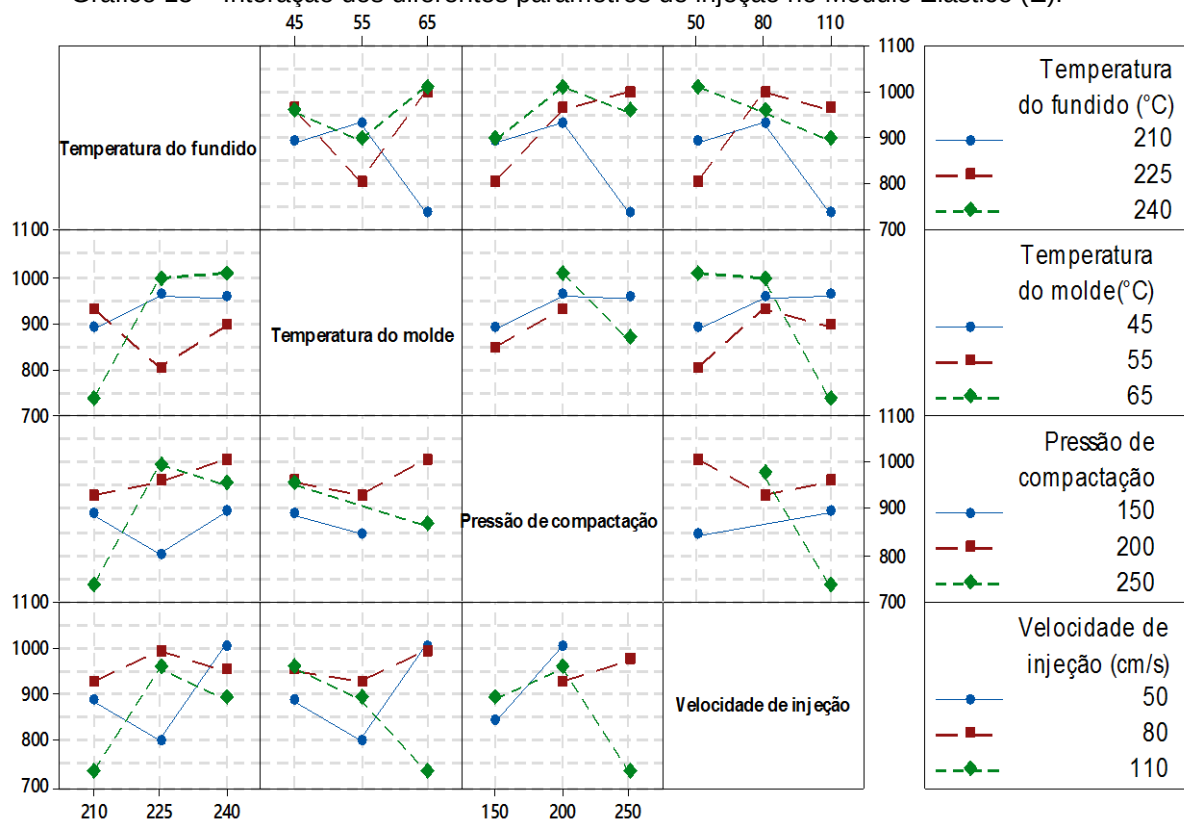
No gráfico 14, temos os efeitos das interações dos diferentes parâmetros de injeção na propriedade de Resistência sob Tração (RT). Pode-se observar que a pressão de compactação, como demonstrado na Análise de Variância (ANOVA), é uma das que apresenta as maiores mudanças nessa propriedade mecânica,

A Resistência sob Tração tende a aumentar com a pressão de compactação na região de 150 a 200 bar e então sofrendo redução quando chega a 250 bar.

Isso se repete em quase as interações da pressão de compactação com os outros parâmetros estudados. Uma das exceções é quando foi utilizada uma temperatura de fundido de 225 °C (1ª linha, 3ª quadrado, curva vermelha). Isso devido ao fato de que a perda na propriedade causada pela pressão é compensada pelo aumento causado temperatura do fundido.

A temperatura do fundido que apresentou as melhores propriedades na maioria das interações foi a de 225 °C, assim com a temperatura do molde de 65 °C, mas o aumento na Resistência não foi tão pronunciado.

Gráfico 15 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção no Módulo Elástico (E).

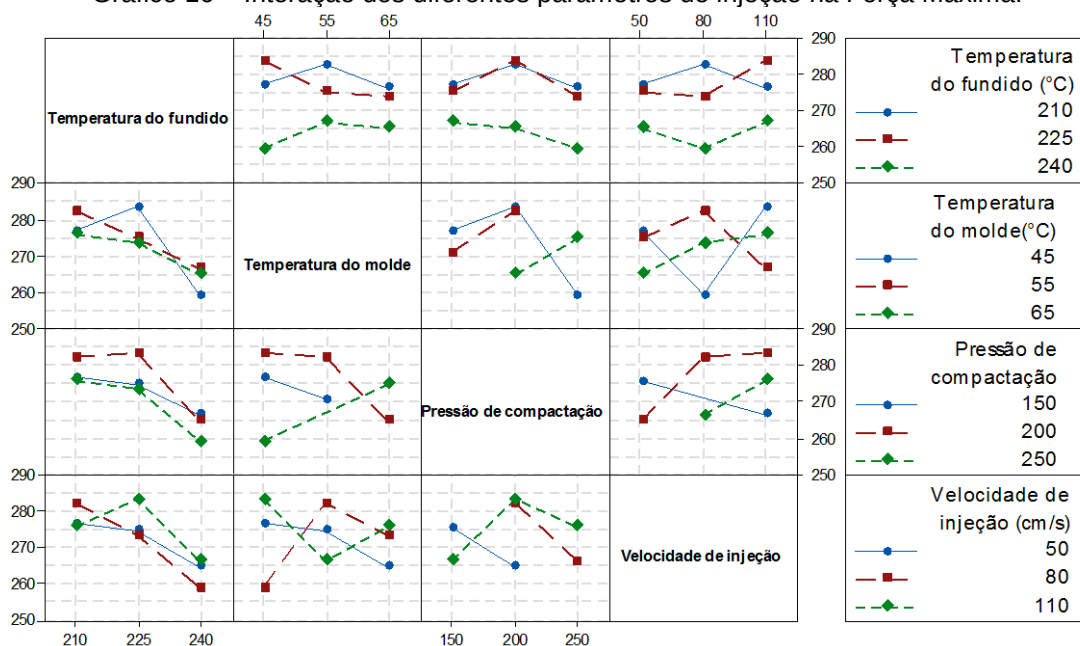


Fonte: O autor.

No gráfico 15, temos os efeitos das interações dos diferentes parâmetros de injeção no Módulo Elástico (E). Pode-se observar que a pressão de compactação, como demonstrado na Análise de Variância ANAVA, é uma das que apresenta as maiores mudanças nessa propriedade mecânica,

A Resistência sob Tração tende a aumentar com a pressão de compactação na região de 150 a 200 bar e então sofrendo redução quando entre 200 e 250 bar.

Gráfico 16 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção na Força Máxima.

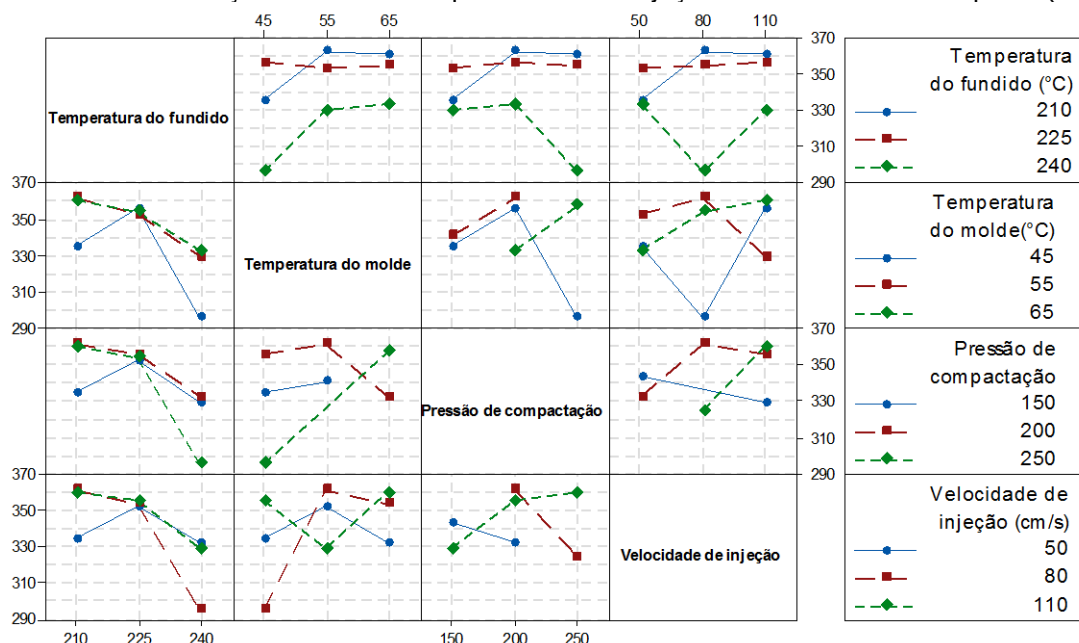


No gráfico 16, temos os efeitos das interações dos diferentes parâmetros de injeção na propriedade de Força Máxima. Apesar de a temperatura do fundido ter sido responsável pela maior contribuição na melhoria dessa propriedade, demonstrado na Análise de Variância ANAVA, pode-se observar que o aumento não é muito pronunciado, devido as interações com os outros parâmetros do processo de injeção.

Mas pode se observar que ao se usar uma temperatura do fundido de 240°C, todas as interações contra os outros parâmetros resultaram nas menores propriedades (comparando com a temperatura de 210 e 225°C). Além disso, as temperaturas do fundido de 210 e 225 °C não apresentam grande diferença entre na maioria das interações.

Quanto a pressão de compactação, que foi o segundo fator que mais apresentou influência na Força Máxima geralmente apresentou o melhor valor dessa propriedade quando foi usado o valor de 200 bar no processo de injeção.

Gráfico 17 – Interação dos diferentes parâmetros de injeção na Resistência ao Impacto (RI).



Fonte: O autor.

No gráfico 17, temos os efeitos das interações dos diferentes parâmetros de injeção na propriedade de Resistência ao Impacto (RI). Apesar de a temperatura do fundido ter sido responsável pela maior contribuição na melhoria dessa propriedade, demonstrado na Análise de Variância (ANAVA), pode-se observar que a mudança nessa propriedade não é muito pronunciada, devido as interações com os outros parâmetros do processo de injeção.

Pode-se observar que ao se usar uma temperatura do fundido de 210°C, obtém-se que as melhores Resistência ao Impacto em 6 dos casos, exceto quando se usa os valores mais baixos dos outros parâmetros. Ao subir a temperatura do fundido para 225°C, há uma leve queda na propriedade mecânica. Essa queda aumenta mais ao se usar 240 °C de temperatura.

Quanto à temperatura do molde, que foi o segundo fator que mais apresentou influência na Resistência ao Impacto, em muitas das interações ocorre um aumento dessa propriedade entre 45 e 55 °C, seguido de uma estabilização entre 55 e 65 °C.

## 5.7 ANÁLISE DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA

A massa dos corpos foi determinada no intuito de observar se as diferentes condições de injeção afetaram a densidade das amostras. Valores de massa baixos podem indicar presença de defeitos, tais como poros e preenchimento incompletos, que afetam as propriedades mecânicas de produtos injetados.

Corpos de prova de tração, após 24 horas de ambientação a temperatura ambiente, foram pesados numa balança. Foram usadas 10 réplicas de cada condição, como demonstrado na tabela 24.

Tabela 27 – Massa média dos corpos de prova de tração nas diferentes condições de injeção.

| Condição | Massa (g)    |
|----------|--------------|
| A        | 7,64 ± 0,065 |
| B        | 7,98 ± 0,002 |
| C        | 8,02 ± 0,001 |
| D        | 8,01 ± 0,002 |
| E        | 7,94 ± 0,002 |
| F        | 8,04 ± 0,001 |
| G        | 8,06 ± 0,006 |
| H        | 7,95 ± 0,002 |
| I        | 8,00 ± 0,001 |

Fonte: O autor.

Pode-se observar uma leve diferença entre as condições de injeção. A condição A apresentou a menor massa e a maior variação (desvio padrão) de todas as condições, devido ao preenchimento incompleto, que por sua vez ocorreu devido aos valores muito baixos dos parâmetros de injeção.

Da mesma forma que realizado nas propriedades mecânicas, foi realizada a Análise de Variância, a fim de se entender e avaliar quais dos 4 parâmetros de injeção estudados tiveram influência significativa.

Tabela 28 – ANAVA aplicado à variação de massa.

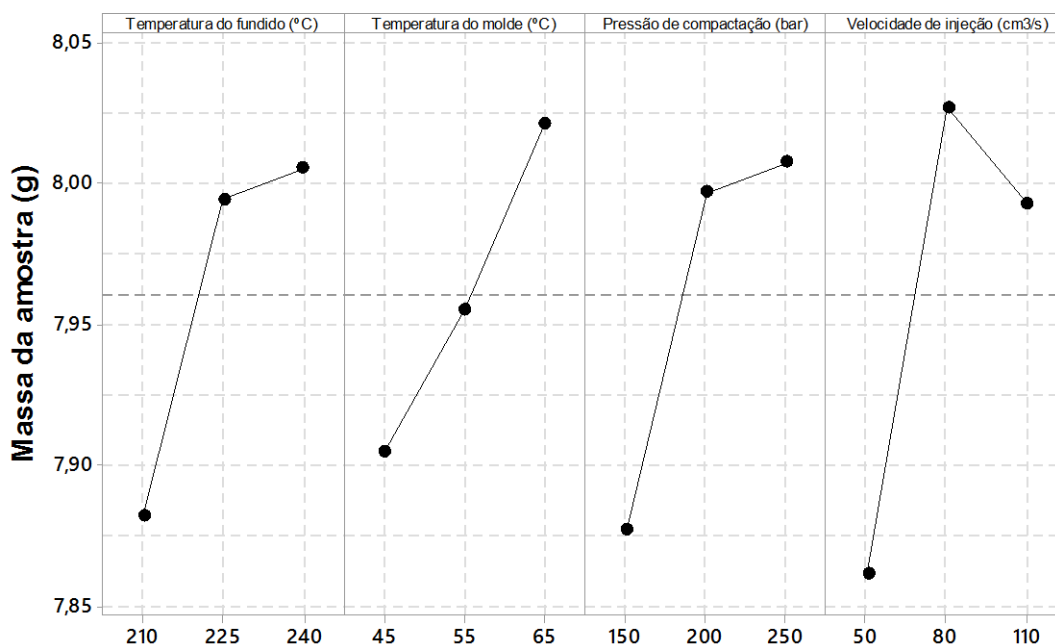
| Parâmetro              | DOF | Soma dos quadrados | Contribuição (%) |
|------------------------|-----|--------------------|------------------|
| Temperatura do fundido | 2   | 0,028              | 22,27            |
| Temperatura do molde   | 2   | 0,020              | 16,30            |
| Pressão de compactação | 2   | 0,031              | 24,96            |
| Velocidade de injeção  | 2   | 0,046              | 36,47            |
| Erro                   | 0   |                    |                  |
| Total                  |     | 0,145              | 100,00           |

Fonte: O autor.

A Análise de Variância apontou que todos os parâmetros de injeção tiveram influência semelhante na massa dos corpos de prova. A velocidade de injeção teve uma contribuição percentual de 36,47 %, seguido da pressão de

compactação (24,96 %), temperatura do fundido (22,27%) e temperatura do molde (16,30%). No gráfico abaixo temos o perfil de variação da massa com os fatores.

Gráfico 18 – Perfil de variação da massa dos corpos de prova de tração, de acordo com os parâmetros de injeção.



Fonte: O autor.

Como pode-se observar, ocorre um aumento da massa média dos corpos de prova conforme aumenta a temperatura do fundido, temperatura do molde e pressão de compactação. Apenas a velocidade de injeção apresentou um aumento entre 50 e 80 cm³/s, mas a partir de 110 cm³/s apresenta um decréscimo.

Maiores temperaturas, tanto do molde quanto do fundido, permitem menores viscosidades, fazendo um melhor preenchimento. Já a pressão de compactação maior permite maiores reduções de volume. Por sua vez, velocidades de injeção maiores um es podem promover um fluxo mais turbulento, promovendo preenchimento não tão eficiente.

## 5.8 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR

A Análise de Regressão é outra ferramenta estatística que foi utilizada nesse trabalho para investigação das relações entre variáveis. O modelo de regressão linear único capaz de relacionar uma propriedade com quatro parâmetros simultâneos.

Quando o valor do coeficiente de regressão  $R^2$  fica próximo de 1, significa que o resultado está bem representado pelo modelo linear.

A partir da regressão foram obtidas 4 diferentes equações de regressão linear, sendo uma cada propriedade estudada nesse trabalho.

Equação 11 – Regressão linear para Resistência Máxima sob Tração (RT).

$$RT = 25,59 + 0,022 \times A + 0,026 \times B + 0,009 \times C + 0,002 \times D$$

$$R^2 = 0,430$$

Equação 12 – Regressão linear para Módulo Elástico (E).

$$E = 214 + 3,34 \times A - 2,15 \times B + 0,693 \times C + 0,98 \times D$$

$$R^2 = 0,358$$

Equação 13 – Regressão linear para Força Máxima.

$$Fmax = 388,5 - 0,498 \times A - 0,007 \times B - 0,047 \times C + 0,0803 \times D$$

$$R^2 = 0,772$$

Equação 14 – Regressão linear para Resistência ao Impacto (RI).

$$RI = 533 - 1,107 \times A + 1,269 \times B - 0,148 \times C + 0,224 \times D$$

$$R^2 = 0,726$$

Onde:

A = Temperatura do fundido, em K;

B = Temperatura do molde, em K;

C = Pressão de compactação, em bar;

D = Velocidade de Injeção em  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;

$R^2$  = Coeficiente de regressão linear.

Como se pode ver o modelo de regressão linear não é suficiente para avaliar a interação entre os parâmetros de injeção e as propriedades de tração (RT e E) medidas, devido aos baixos valores de  $R^2$ , os quais estão bem diferentes de  $R^2 = 1$  (relação totalmente linear). Mas para as propriedades de impacto é possível uma relação quase-linear devido aos valores dos coeficientes mais elevados.

## 5.9 SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Ao se observar o comportamento das propriedades mecânica em relação aos parâmetros de injeção, na maioria dos casos as propriedades apresentam um ponto máximo, seguido de queda.

No intuito de entender melhor as interações entre os parâmetros e as propriedades, foi feito uma análise de superfície de resposta. A Superfície de Resposta é uma ferramenta usada para determinar o Projeto (Design) de Experimentos, assim como o Fatorial Pleno e o Método Taguchi Ortogonal. Em relação a quantidade de experimentos necessários ela ficaria entre os outros dois métodos citados, muitas vezes usando o Fatorial Pleno como sua própria base de experimentos.

A limitação dela é que ela, apesar de poder ser usada para avaliar uma grande quantidade de fatores, é necessário agrupá-los dois a dois. Esse agrupamento pode ser em gráficos bidimensionais ou tridimensionais, com a propriedade em questão sendo avaliada no eixo z. Nos gráficos bidimensionais, são definidas regiões onde a propriedade atinge determinado valor.

Portanto, se baseando nos resultados do ANAVA e do Taguchi em si, será avaliado como os parâmetros influenciam as propriedades em pares, mas considerando os parâmetros que possuem influencia significativamente, que, nesse trabalho, será considerado acima de 10 % de contribuição na alteração da propriedade.

Os dois fatores restantes que não estão apresentados nas Superfícies de Resposta serão mantidos fixos, usando seus valores otimizados determinados também pela Superfície de Resposta

### 5.9.1 Superfície de Resposta: Resistência sob Tração (RT)

Como visto na ANAVA, os parâmetros com maior efeito sobre a resistência sob tração em ordem decrescente: pressão de compactação (56,18 %), temperatura do molde (18,87 %), temperatura do fundido (15,70 %) e velocidade de injeção (9,24%).

Quanto aos seus valores otimizados determinados por Taguchi, temos que a pressão de compactação foi de 200 bar, temperatura do molde de 65 °C, temperatura do fundido de 225 °C e velocidade de injeção de 80 cm<sup>3</sup>/s.

Usando os dados dos ensaios mecânicos, foi determinada a equação de regressão, mostrada abaixo.

Equação 15 – Equação de Superfície de Resposta para Resistência sob Tração (RT).

$$RT = -86,54 + 0,91xA - 0,33xB + 0,18xC + 0,1492xD - 0,001985 A*A \\ + 0,003 B*B - 0,0004 C*C - 0,001 D*D$$

$$R^2 = 1,00$$

Onde:

RT – Resistência sob Tração, em MPa;

A – Temperatura do fundido, em °C;

B – Temperatura do molde, em °C;

C – Pressão de compactação, em bar;

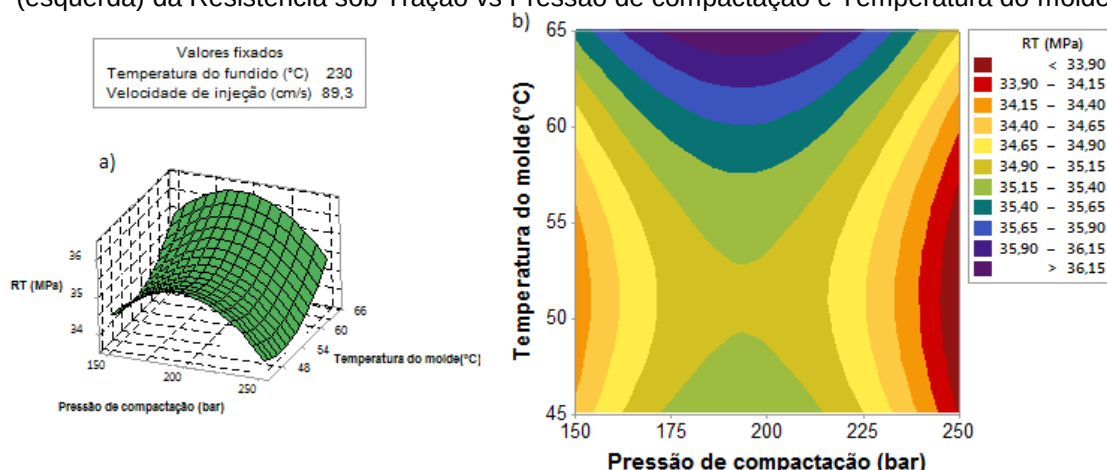
D – Velocidade de injeção, em cm<sup>3</sup>/s;

R<sup>2</sup> – Coeficiente de Regressão.

A partir das superfícies de resposta e dos dados experimentais, foi determinado que as condições ideais a fim de se otimizar a Resistência sob Tração (RT) são temperatura do fundido de 230 °C, temperatura do molde de 65 °C, pressão de compactação de 193,4 bar e velocidade de injeção de 83,9 cm<sup>3</sup>/s. Utilizando esses valores o valor previsto de Resistência sob Tração é de 36,407 MPa.

A partir dos dados experimentais obtidos, é possível montar a curva de Resistência sob Tração em função da pressão de compactação e da temperatura do molde, assim como em função da pressão de compactação e da temperatura do fundido, como apresentado na figura 26.

Figura 26 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência sob Tração vs Pressão de compactação e Temperatura do molde.

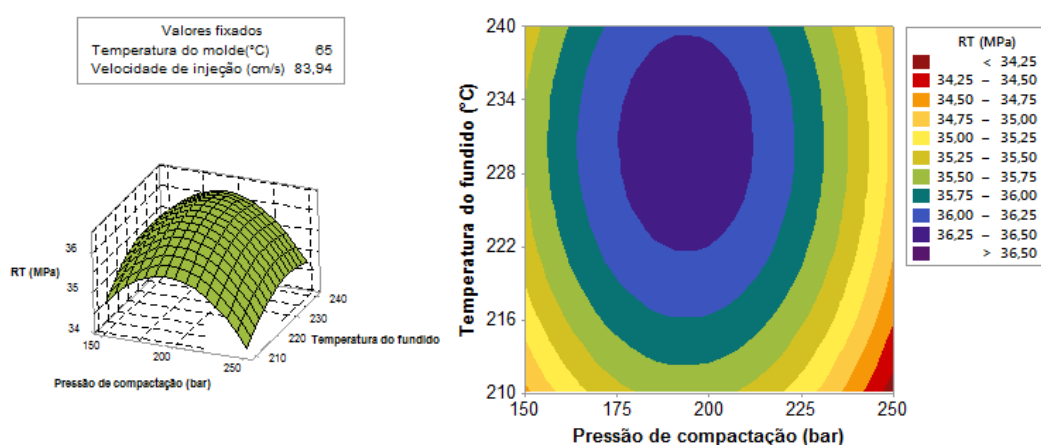


Fonte: O autor.

O gráfico da esquerda é a representação tridimensional da superfície de resposta, enquanto o gráfico da direita é a projeção bidimensional. Em temperaturas de molde mais altas e na pressão de compactação em torno de 200 bar ocorre as tensões sob tração mais elevadas.

Conforme apontou a ANAVA a temperatura do fundido também é um fator a se levar em conta quando se tem como objetivo otimizar a Resistência sob Tração. Então foi plotado a superfície de resposta da Resistência sob Tração em função da Pressão de compactação e da Temperatura do fundido, apresentado na figura 27.

Figura 27 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência sob Tração vs Pressão de compactação e Temperatura do fundido.

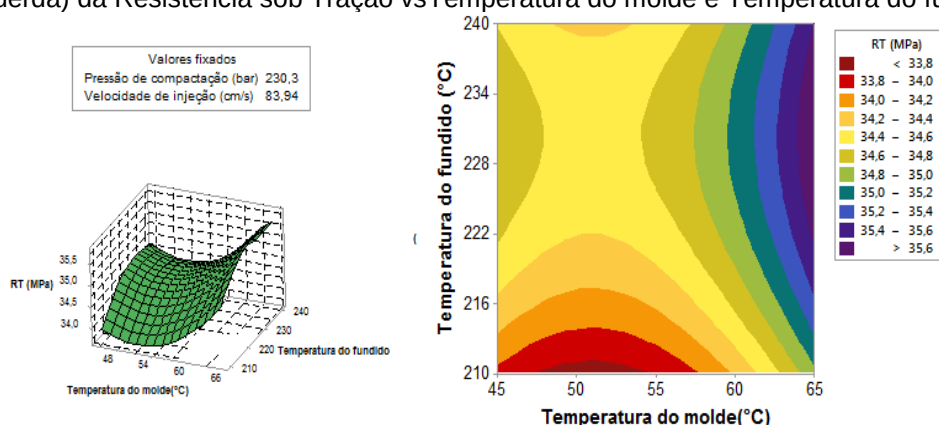


Fonte: O autor.

O perfil apresentado em relação a esses dois parâmetros é diferente do que foi visto na figura 26. Nesse caso os maiores valores de Resistência sob Tração foram obtidos com valores medianos de pressão e temperatura.

Por fim é apresentada a superfície de reposta considerando dessa vez os dois fatores secundários: a temperatura do molde e a temperatura do fundido, na figura 28.

Figura 28 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência sob Tração vs Temperatura do molde e Temperatura do fundido.



Fonte: O autor.

Em relação ao efeito da pressão de compactação, o efeito da temperatura do molde e do fundido na resistência sob tração não é tão pronunciado, onde seus maiores valores são obtidos na pequena região em torno de 65 °C de temperatura do molde e entre 222 e 240°C de temperatura do fundido.

#### 5.9.2 Superfície de Resposta: Modulo Elástico (E)

A partir da ANAVA, foi obtido que, assim como na propriedade de resistência sob tração, a pressão de compactação foi o parâmetro que exerceu maior influência sobre o Módulo Elástico (44,84 % de contribuição), seguido da temperatura do fundido (24,22 %) e da velocidade de injeção (22,69 %). A temperatura do molde teve um efeito minoritário em relação aos outros parâmetros.

Usando os dados dos ensaios mecânicos, foi determinada a equação de regressão, mostrada abaixo.

Equação 16 – Equação de Superfície de Resposta para Módulo Elástico (E)

$$E = -4052 + 39,74 A - 54,62 B + 13,09C + 13,61D - 0,01 A*A + 0,49 B*B - 0,035 C*C - 0,09 D*D$$

$$R^2 = 1,00$$

Onde:

E – Módulo Elástico, em MPa;

A – Temperatura do fundido, em °C;

B – Temperatura do molde, em °C;

C – Pressão de compactação, em bar;

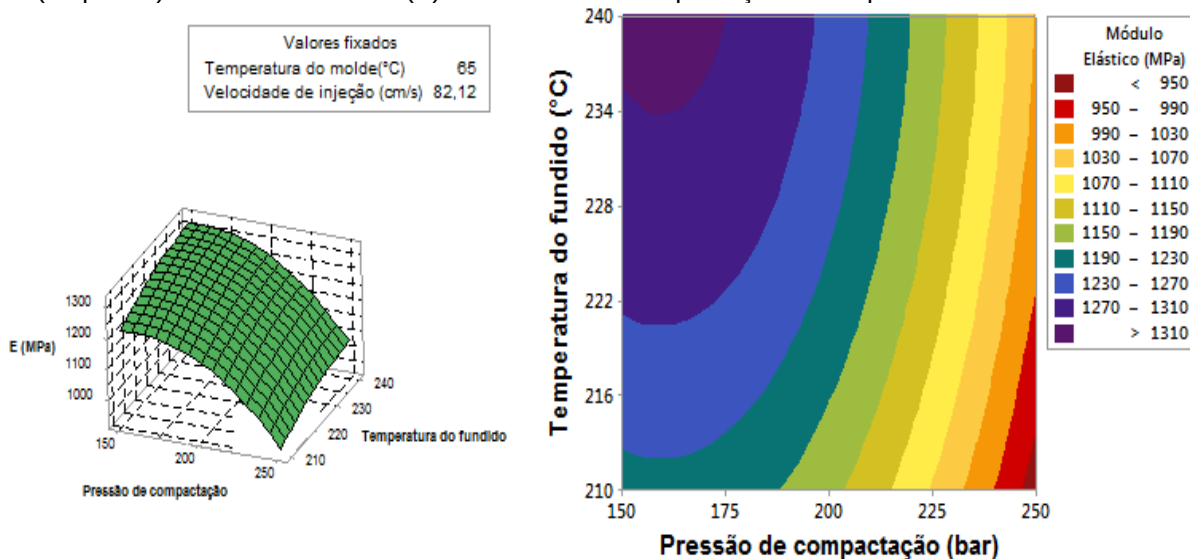
D – Velocidade de injeção, em cm<sup>3</sup>/s;

R<sup>2</sup> – Coeficiente de Regressão.

A partir da otimização por superfície de resposta, é previsto que usar temperatura do fundido de 240 °C, temperatura do molde de 65 °C, pressão de compactação de 159,09 e velocidade de injeção de 82,12 cm<sup>3</sup>/s, com o valor do Módulo Elástico sendo previsto para o valor máximo de 1318,897 MPa.

A partir dos dados experimentais e das análises estatísticas, foi feito as superfícies de resposta para os pares de parâmetros Pressão de compactação vs Temperatura do fundido, Pressão de compactação vs Velocidade de injeção e Temperatura do fundido vs velocidade de injeção.

Figura 29 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Pressão de compactação e Temperatura do fundido.

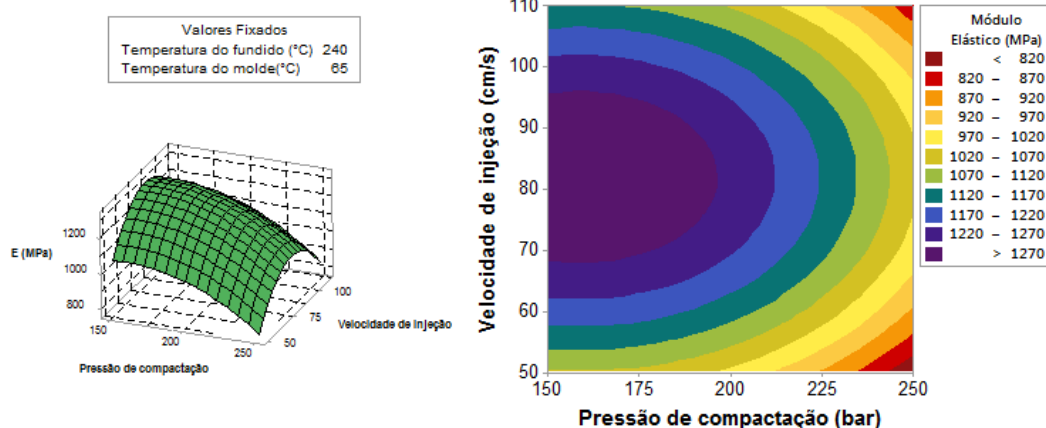


Fonte: O autor.

A partir das superfícies de resposta pode-se notar que o valor do Módulo Elástico é obtido altas temperaturas do fundido e baixas pressões de compactação.

Em seguida temos a superfície de resposta para os parâmetros de pressão de compactação e velocidade de injeção, a qual possui semelhante influência no módulo elástico quando comparada à temperatura do fundido. A temperatura do fundido e do molde foram fixadas em seus valores otimizados, determinados pela superfície de resposta. A superfície de resposta é apresentada na figura 30.

Figura 30 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Pressão de compactação e Velocidade de Injeção.



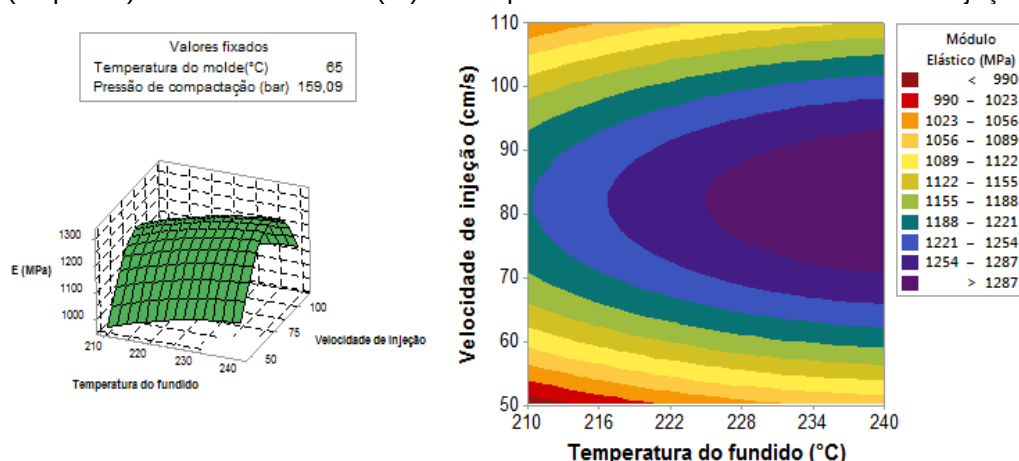
Fonte: O autor.

Segundo as duas superfícies de resposta, os maiores valores de Módulo Elástico são obtidos em valores baixos de pressão de compactação (entre 150 e 200 bar) e valores intermediários de velocidade de injeção, entre 70 e 95 cm<sup>3</sup>/s.

Por fim a superfície de resposta foi plotada em função dos dois parâmetros que tiveram influência secundária, quando comparadas a pressão de compactação: a temperatura do fundido e a velocidade de injeção.

Os maiores valores previstos de Módulo Elástico são obtidos em altas temperaturas do fundido e velocidade de injeção intermediários, como pode ser observado na figura 31. O Módulo Elástico se apresentou com menor sensibilidade à esses dois parâmetros, quando comparado ao efeito da pressão de compactação.

Figura 31 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Temperatura do fundido e Velocidade de injeção.



Fonte: O autor.

### 5.9.3 Superfície de Resposta: Força Máxima

A Força Máxima é um parâmetro obtido no ensaio de impacto instrumentado. Segundo a ANAVA, a temperatura do fundido exerceu influência majoritária, com uma contribuição percentual de 78,33% nessa propriedade, seguida pressão de compactação (13,33 %). A temperatura do molde e a velocidade de injeção não exerceram influência a ser considerada.

Usando os dados dos ensaios mecânicos, foi determinada a equação de regressão, mostrada abaixo.

Equação 17 – Equação de Superfície de Resposta para Força Máxima

$$F_{MAX} = -1182 + 12,22A + 2,50B + 0,92 C - 0,3193 D - 0,03 A*A - 0,02 B*B - 0,002 C*C + 0,002 D*D$$

$$R^2 = 1,00$$

Onde:

$F_{MAX}$  – Resistência sob Tração, em MPa;

A – Temperatura do fundido, em °C;

B – Temperatura do molde, em °C;

C – Pressão de compactação, em bar;

D – Velocidade de injeção, em cm<sup>3</sup>/s;

$R^2$  – Coeficiente de Regressão.

A partir da otimização por superfície de resposta, o valor mais elevado de Força Máximo previsto foi de 287,01 N, utilizado temperatura do fundido de

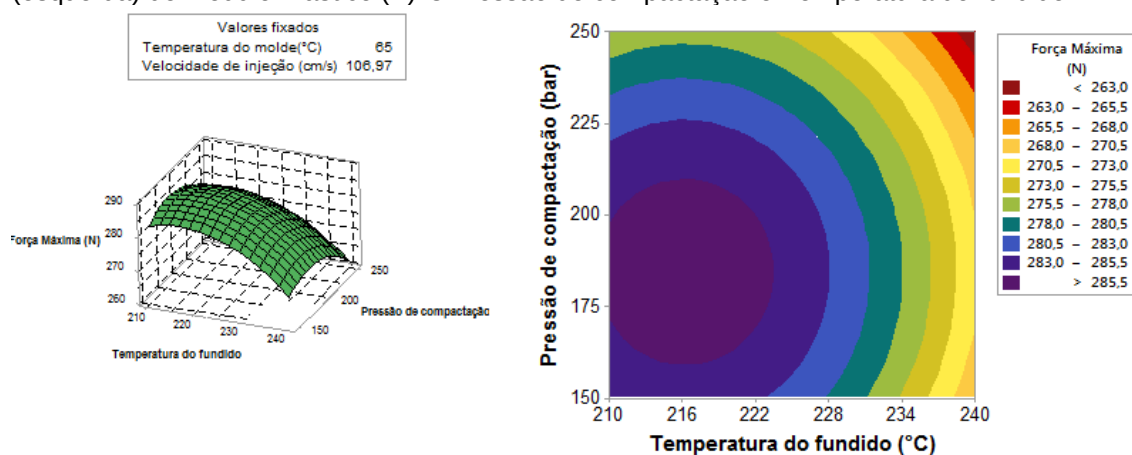
216,36 °C, temperatura do molde de 65 °C, pressão de compactação de 184,34 bar e velocidade de injeção de 106,97 cm<sup>3</sup>/s.

A partir dos dados experimentais, foi possível obter a superfície de resposta mostrada abaixo. Os valores de pressão de compactação e de velocidade foram fixados em seus valores otimizados determinados pela superfície de resposta.

Os maiores valores de Força Máxima foram obtidos entre 210 e 220 °C de temperatura do fundido e Pressão de compactação entre 160 e 210 bar. Esse parâmetro não é muito sensível às condições de injeção, sendo provavelmente valor associado mais ao material do que às condições de processo.

Na figura 32, é mostrado a previsão de variação de Força Máxima em relação a pressão de compactação e à temperatura do fundido.

Figura 32 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) do Módulo Elástico (E) vs Pressão de compactação e Temperatura do fundido.



Fonte: O autor.

#### 5.9.4 Superfície de Resposta: Resistência ao Impacto

Assim como no caso da Força Máxima, somente dois parâmetros de injeção influenciaram consideravelmente essa propriedade. Através da ANAVA, temos que a temperatura do fundido e a temperatura do molde tiveram significativa influência nessa propriedade, com contribuição percentual de 64,28 e 21,56%, respectivamente.

Usando os dados dos ensaios mecânicos, foi determinada a equação de regressão, mostrada abaixo.

Equação 18 – Equação de Superfície de Resposta para Resistência ao Impacto (RI)

$$RI = -3922 + 34,86 A + 11,10 B + 1,98 C - 1,15 D - 0,08 A*A - 0,09 B*B - 0,005 C*C + 0,008 D*D$$

$$R^2 = 1,00$$

Onde:

RI – Resistência sob Tração, em MPa;

A – Temperatura do fundido, em °C;

B – Temperatura do molde, em °C;

C – Pressão de compactação, em bar;

D – Velocidade de injeção, em cm<sup>3</sup>/s;

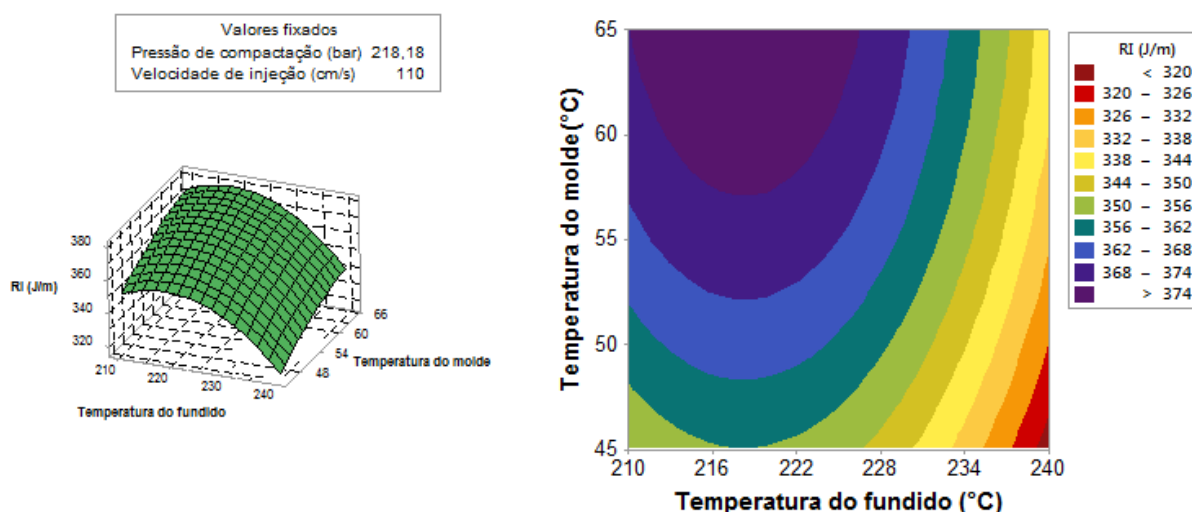
R<sup>2</sup> – Coeficiente de Regressão.

A propriedade de Resistência ao Impacto (RI) foi otimizada usando superfície de resposta. Usando temperatura do molde de 218,18 °C, temperatura do fundido de 65 °C, pressão de compactação de 190,40 bar e velocidade de injeção de 110 cm<sup>3</sup>/s, obteve o valor máximo previsto de 383,490 J/m.

Abaixo foi plotado a superfície de resposta da Resistência ao Impacto em função da temperatura do fundido e do molde. Os valores de velocidade de injeção e pressão de compactação foram fixados em seus valores otimizados.

Na figura 33, é mostrada a previsão da Resistência ao Impacto via Superfície de Resposta, onde pode-se notar que os maiores valores previstos de Resistência ao Impacto (RI) são obtidos em baixas temperaturas do fundido e altas temperaturas do molde.

Figura 33 – Superfície de Resposta, com projeção bidimensional (direita) e tridimensional (esquerda) da Resistência ao Impacto (RI) vs Temperatura do fundido e Temperatura do molde.



Fonte: O autor.

#### 5.9.5 Superfície de Resposta: Interação entre parâmetros

A Superfície de Resposta permite avaliar a variação da propriedade em questão em relação a dois parâmetros simultaneamente e permitindo avaliar a interação entre eles.

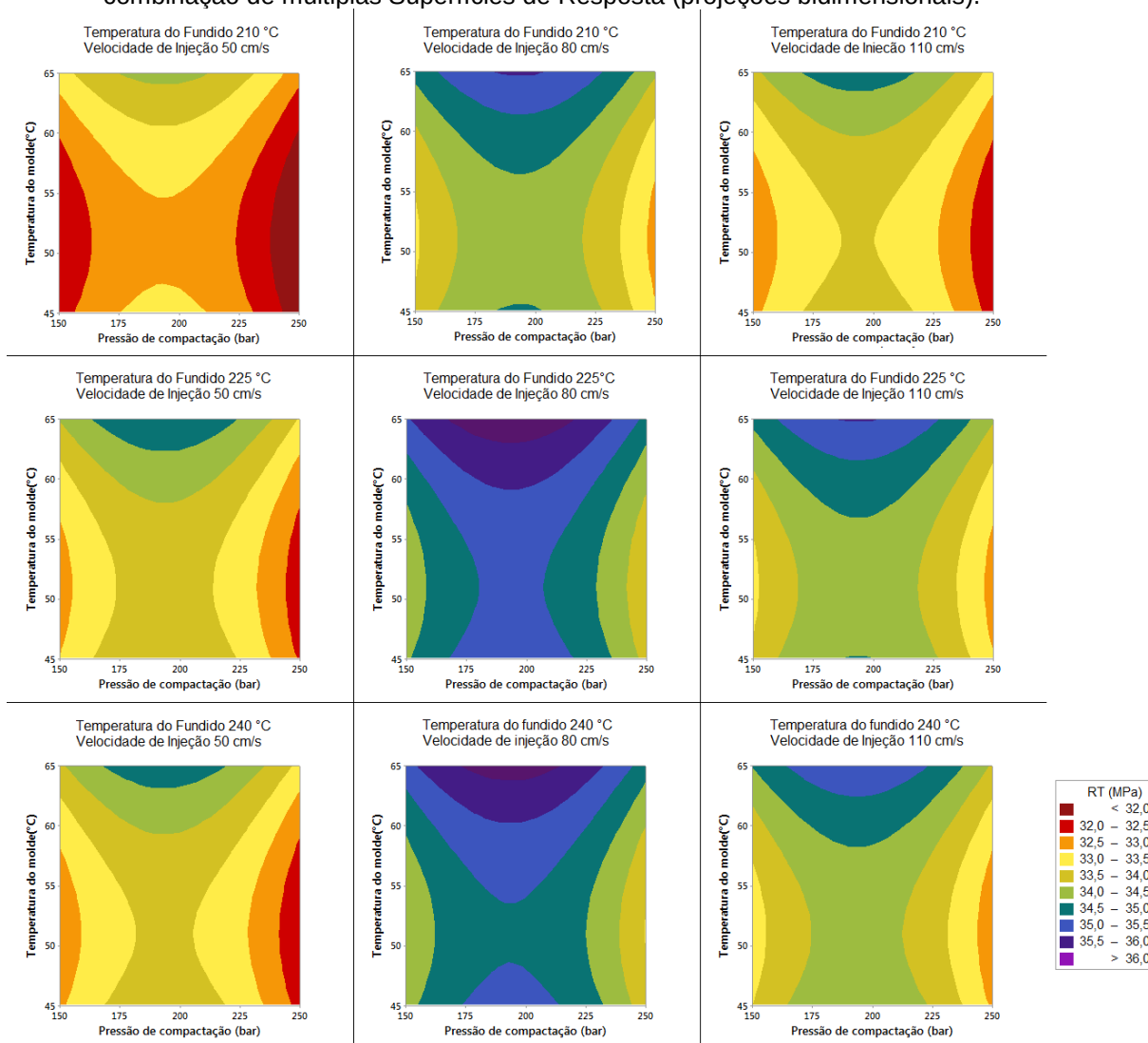
Apesar de ser limitada a um par de parâmetros a cada vez, é possível determinar a resposta da propriedade em relação a três ou mais parâmetros, ao se utilizar mais gráficos, traçando assim um perfil, que permite melhor entendimento da influência dos parâmetros de processo na propriedade desejada.

A partir disso, foram montados os conjuntos de gráficos abaixo. Nos gráficos individuais temos o efeito dos dois parâmetros (ordenadas e abscissas) que tiveram maior influência na propriedade, determinados pela Análise de Variância ANAVA.

Por sua vez, da esquerda para direita e da parte superior para a inferior, tem-se o efeito dos outros dois parâmetros de injeção.

A figura 34 abaixo mostra o efeito dos parâmetros de injeção na Resistência sob Tração do ABS.

Figura 34 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistência sob Tração (RT), obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de Resposta (projeções bidimensionais).



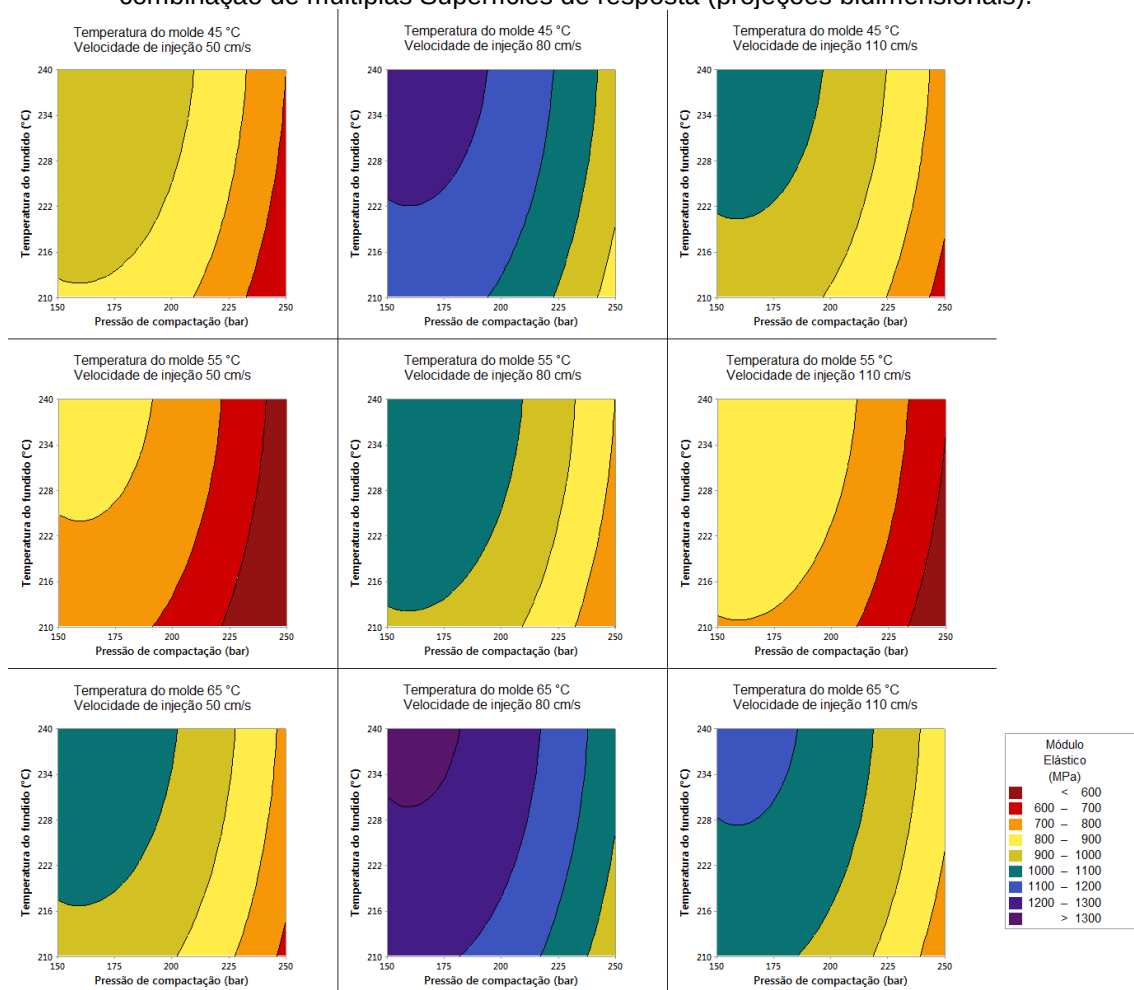
Fonte: O autor.

Como pode ser observado, os maiores valores de RT são obtidos em temperatura do molde elevadas (65 °C) e pressão de compactação medianas (na faixa de 200 bar).

Quanto aos outros dois parâmetros, os valores mais elevados de Resistência sob Tração são obtidos em valores intermediários de velocidade de injeção (80 cm<sup>3</sup>/s) e de temperatura de fundido (225 – 240 °C). Entre os maiores e os menores valores obtidos, há uma variação de mais de 10% nessa propriedade.

A figura 35 mostra o efeito dos 4 parâmetros no Módulo Elástico, via Superfície de Resposta.

Figura 35 – Influência dos parâmetros de injeção no Módulo Elástico (E), obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de resposta (projeções bidimensionais).



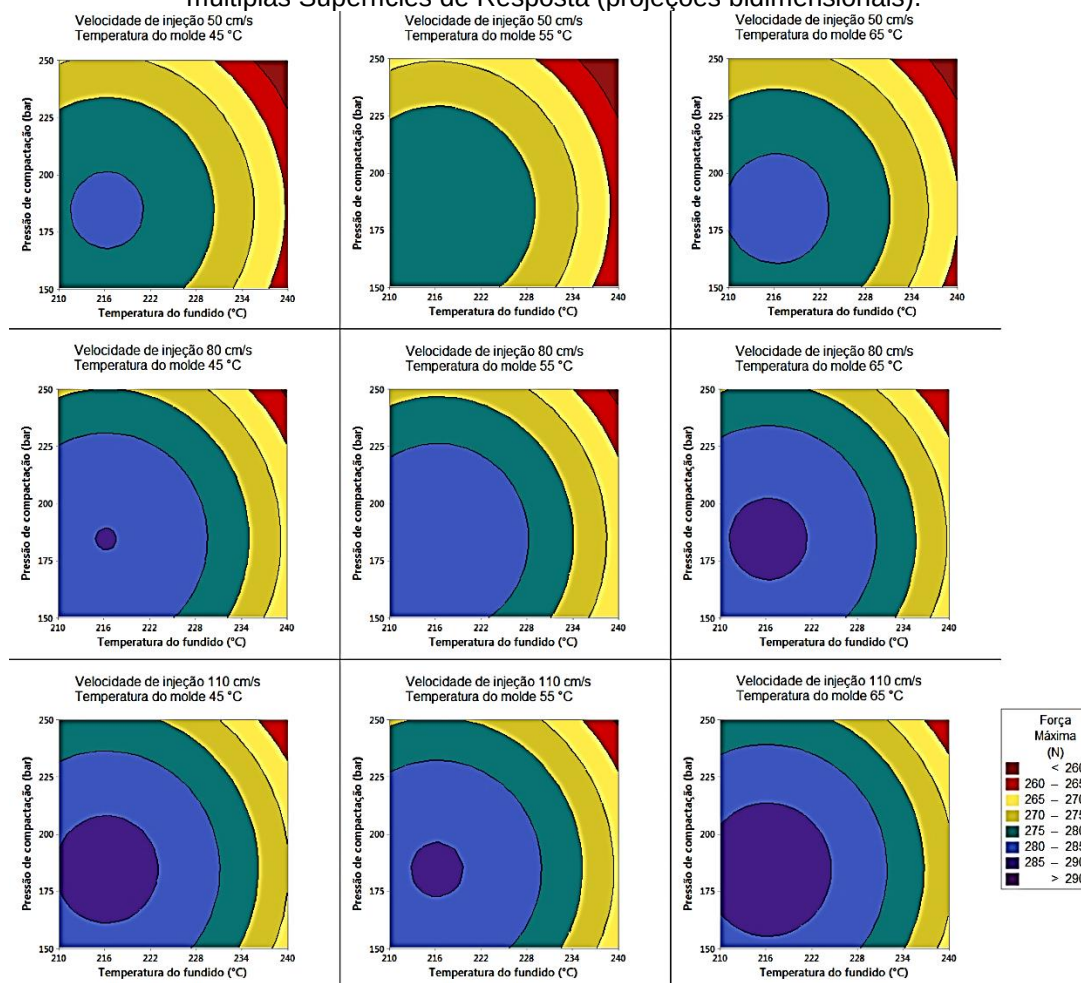
Fonte: O autor.

No caso do Módulo Elástico E, a pressão de compactação e a temperatura do fundido foram os fatores que tiveram os maiores efeitos nessa propriedade. Os maiores valores de Módulo Elástico ocorreram em baixas pressões de compactação e altas temperaturas do fundido.

Quanto aos parâmetros secundários (temperatura do molde e velocidade de injeção), percebe-se um aumento do Módulo Elástico em altas temperaturas do molde e velocidade de injeção intermediária. Segundo as estimativas da Superfície de Resposta, o Módulo E varia de valores menores de 600 MPa até valores maiores que 1300 MPa.

Deve se levar em conta que o valor medido através dos experimentos não é preciso, devido ao fato de que foi calculado com base nos valores estimados de deformação.

Figura 36 – Influência dos parâmetros de injeção na Força Máxima, obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de Resposta (projeções bidimensionais).



Fonte: O autor.

Os valores de Força Máxima não apresentaram grande variação, não sendo valor muito sensível às condições de injeção. Os seus maiores valores foram obtidos em baixas temperaturas do fundido e baixas pressões de compactação.

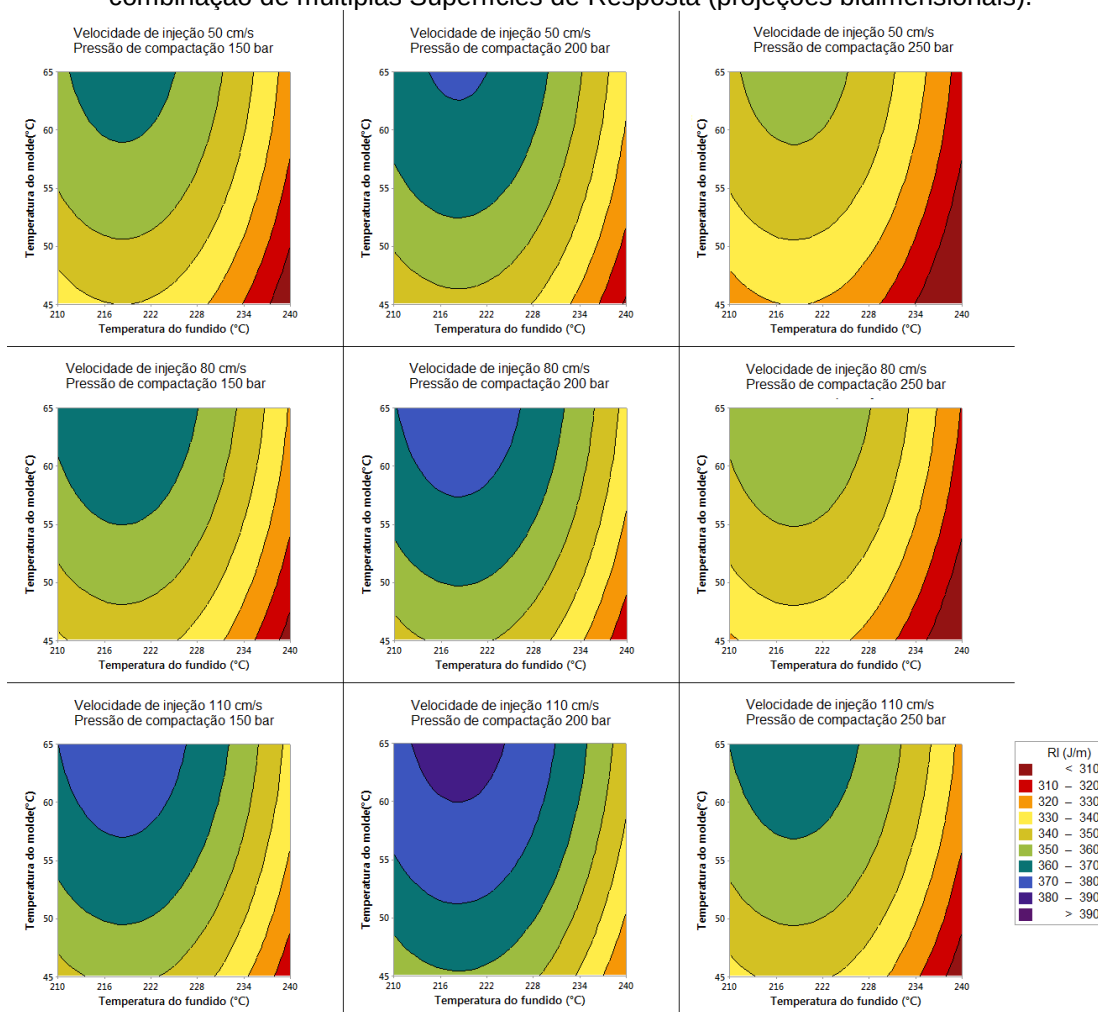
O valor dessa propriedade apresenta tendência em aumentar levemente com a velocidade de injeção, porém em temperaturas do molde de 55 °C apresentou seus mais baixos valores.

Um fato interessante é que quanto maior a diferença entre a temperatura do fundido e do molde, menor é o valor de força máxima. Esse parâmetro se refere ao ponto em que começa a propagação instável da trinca, a partir da qual ocorrerá a fratura. Em teoria, maiores gradientes de temperatura entre fundido e molde induzem tensões térmicas no material, deixando-o mais frágil.

Uma prova disso é a condição G (240 °C de temperatura do fundido e 45 °C do molde), a qual apresentou delaminação em sua microestrutura, além de apresentar as menores propriedades de impacto de todas as condições de injeção testadas.

A figura 37 mostra a variação da Resistência ao Impacto em função dos 4 parâmetros de injeção, via Superfície de Resposta.

Figura 37 – Influência dos parâmetros de injeção na Resistência ao Impacto (RI), obtida pela combinação de múltiplas Superfícies de Resposta (projeções bidimensionais).



Fonte: O autor.

A Resistência ao Impacto (RI) é uma propriedade de grande interesse para se melhorar no caso do material ABS, visto que é uma de suas principais qualidades.

Quanto a temperatura do fundido e do molde, os quais são os principais fatores que afetaram essa propriedade em questão, temos que altas

temperaturas do molde (perto de 65 °C) e temperaturas do fundido entre 215 e 225 °C tendem a elevar a RI do ABS.

A velocidade de injeção e a pressão de compactação exerceram influência minoritária nessa propriedade. O aumento da velocidade de injeção tende a aumentar a RI (entre 50 e 110 cm<sup>3</sup>/s). Já no caso da pressão de compactação, valores intermediários são mais indicados para melhoria da RI do ABS.

#### 5.9.6 Otimização de múltiplas respostas simultâneas

Quando se busca selecionar ou aperfeiçoar as propriedades de um material ou produto, geralmente é visada uma combinação ótima de propriedades. A técnica de Superfície de Resposta possui uma vantagem singular em relação ao Método Taguchi que é a otimização de múltiplas propriedades, podendo maximizá-las, minimizá-las ou atingir um valor específico, tudo numa análise somente.

A partir dessa otimização, abaixo são mostradas algumas combinações de propriedades, previstas pela superfície de resposta.

Tabela 29 – Previsão de propriedades mecânicas em diferentes condições de injeção via Superfície de Resposta.

| Combinação | A   | B  | C   | D                  | RT           | E              | Fmax          | RI            | D    |
|------------|-----|----|-----|--------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------|
| Unidade    | °C  | °C | bar | cm <sup>3</sup> /s | MPa          | MPa            | N             | J/m           | *    |
| <b>1</b>   | 230 | 65 | 190 | 85                 | <b>36,40</b> | 1266,26        | 280,72        | 365,52        | 0,97 |
| <b>2</b>   | 240 | 65 | 160 | 80                 | 35,68        | <b>1318,89</b> | 268,28        | 332,53        | 0,68 |
| <b>3</b>   | 215 | 65 | 185 | 110                | 35,09        | 1028,01        | <b>286,94</b> | 382,48        | 1,00 |
| <b>4</b>   | 220 | 65 | 190 | 110                | 35,37        | 1040,84        | 286,52        | <b>383,25</b> | 1,00 |
| <b>5</b>   | 210 | 65 | 160 | 90                 | 35,01        | 1202,91        | 283,99        | 367,90        | 1,00 |

Nota: A = Temperatura do fundido; B = Temperatura do molde; C = Pressão de compactação; D = Velocidade de Injeção; RT = Resistência sob Tração; Fmax = Força Máxima; RI = Resistência ao Impacto; D = *deserability*.

Fonte: O autor.

O D é um índice adimensional. Quanto mais próximo de 1,00, melhor a combinação de propriedades. Como se pode ver, não há apenas uma combinação de parâmetros que gera a melhor combinação de propriedades. A *deserability* (D) é calculada pela atribuição de peso para cada parâmetro, é calculada pelo próprio software, sendo uma ferramenta única da Superfície de Resposta.

A condição 1,2,3 e 4 se referem, respectivamente aos máximos valores previstos de Resistência sob Tração, Módulo Elástico, Força Máxima e Resistência ao Impacto. A condição 5 é referente a otimização das 4 propriedades/parâmetros simultaneamente.

Na otimização do Módulo Elástico, ao maximizá-lo nota-se uma redução no índice D considerável. A resistência sob tração não apresentou grande redução, mas a queda é associada às propriedades de impacto.

Essas 5 condições serão injetadas, a fim de se verificar se o modelo consegue prever com eficácia as propriedades, comparando também com a eficácia do Método Taguchi. Os resultados da validação dos modelos são mostrados no próximo tópico.

## 5.10 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Após ter sido realizado todo os experimentos da matriz ortogonal, novos experimentos foram realizados, utilizando os valores otimizados determinados pelo método Taguchi e pela Superfície de Resposta, em 4 condições distintas.

As condições T1 e T2 são referentes a otimização via Método Taguchi Ortogonal; a condição T1 é referente a maximização da Resistência sob Tração (RT) e a T2 é referente a melhoria do Módulo Elástico (E).

As condições S1 e S2, por sua vez, são referentes a maximização e minimização de todas as propriedades/parâmetros como conjunto. A partir dos valores experimentais obtidos, é possível fazer uma previsão dos valores que serão obtidos nas 4 condições otimizadas, apresentadas pela tabela 30.

Tabela 30 – Condições de injeção escolhidas para verificação da eficácia dos modelos.

| Condição de verificação | A (°C) | B (°C) | C (bar) | D (cm³/s) |
|-------------------------|--------|--------|---------|-----------|
| <b>T1</b>               | 225    | 65     | 200     | 80        |
| <b>T2</b>               | 240    | 45     | 200     | 50        |
| <b>S1</b>               | 210    | 65     | 160     | 90        |
| <b>S2</b>               | 240    | 45     | 250     | 50        |

A = Temperatura do fundido; B = Temperatura do molde; C = Pressão de compactação; D = Velocidade de Injeção.

Fonte: O autor.

Após a injeção das condições citadas acima, foram realizados ensaios de tração e impacto, obtendo-se as propriedades/parâmetros de Resistência

sob Tração (RT), Módulo Elástico (E), Força Máxima e Resistência ao Impacto (RI).

Tabela 31– Resultados das propriedades mecânicas das 4 condições de otimização.

| Condição | T <sub>F</sub> | T <sub>M</sub> | P   | V  | RT    | E       | F <sub>MAX</sub> | RI     |
|----------|----------------|----------------|-----|----|-------|---------|------------------|--------|
| T1       | 225            | 65             | 200 | 80 | 33,48 | 1094,19 | 273,61           | 360,34 |
| T2       | 240            | 45             | 200 | 50 | 33,02 | 1073,07 | 275,10           | 334,88 |
| S1       | 210            | 65             | 160 | 90 | 34,38 | 1082,63 | 276,60           | 357,56 |
| S2       | 240            | 45             | 250 | 50 | 33,69 | 1095,64 | 271,77           | 316,78 |

Fonte: O autor.

Os resultados foram comparados com o previsto pelo Método Taguchi, por Superfície de Resposta e por Regressão Linear (5.8). A diferença percentual (DFP), demonstrada entre parênteses, é calculada pela formula abaixo.

Equação 19 – Cálculo da Diferença Percentual (DFP)

$$DFP = \frac{\text{Valor previsto} - \text{Valor obtido}}{\text{Valor previsto}}$$

Tabela 32 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos da propriedade de Resistência sob Tração (RT), em MPa. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido.

| Condição | Obtido       | Taguchi Ortogonal     | Superfície de Resposta | Regressão Linear     |
|----------|--------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| T1       | 33,48 ± 0,42 | 35,92 (6,79%)         | 36,31 (7,79%)          | <b>34,30 (2,40%)</b> |
| T2       | 33,02 ± 0,22 | 33,97 (2,82%)         | <b>33,778 (2,25%)</b>  | 35,81 (7,81%)        |
| S1       | 34,38 ± 0,36 | -----                 | <b>35,01 (1,80%)</b>   | 33,36 (-3,05%)       |
| S2       | 33,69 ± 0,23 | <b>32,72 (-2,97%)</b> | 32,32 (-4,22%)         | 36,26 (7,10%)        |

Fonte: O autor.

Tabela 33 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos da propriedade Módulo Elástico (E), em MPa. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido.

| Condição | Obtido          | Taguchi Ortogonal       | Superfície de Resposta | Regressão Linear        |
|----------|-----------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| T1       | 1034,19 ± 53,55 | <b>1036,88 (0,26%)</b>  | 1227,72 (15,76%)       | 887,82 (-16,49%)        |
| T2       | 1073,07 ± 19,17 | <b>1026,75 (-4,51%)</b> | 931,33 (-15,22%)       | 1277,52 (16,00%)        |
| S1       | 1082,93 ± 27,67 | -----                   | <b>1202,91 (9,97%)</b> | 800,20 (-35,33%)        |
| S2       | 1095,64 ± 28,99 | 891,28 (-22,93%)        | 700,43 (-56,42%)       | <b>1312,17 (16,50%)</b> |

Fonte: O autor.

Tabela 34 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos do parâmetro Força Máxima sob Impacto, em N. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido.

| Condição | Obtido        | Taguchi Ortogonal      | Superfície de Resposta | Regressão Linear       |
|----------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| T1       | 273,61 ± 6,47 | 278,05 (1,60%)         | 282,70 (3,22%)         | <b>272,50 (-0,41%)</b> |
| T2       | 275,10 ± 6,30 | <b>266,56 (-3,22%)</b> | 264,19 (-4,13%)        | 222,96 (-23,39%)       |
| S1       | 276,60 ± 5,84 | -----                  | 283,64 (2,48%)         | <b>282,70 (2,16%)</b>  |
| S2       | 271,77 ± 7,31 | <b>259,49 (-4,73%)</b> | 254,83 (-6,65%)        | 220,56 (-23,22%)       |

Fonte: O autor.

Tabela 35 – Comparação entre os valores obtidos e seus valores previstos pelos diferentes modelos da propriedade de Resistência ao Impacto (RI), em J/m. O valor entre parênteses é referente à diferença percentual entre o previsto e o obtido.

| Condição | Obtido         | Taguchi<br>Ortogonal   | Superfície de<br>Resposta | Regressão Linear |
|----------|----------------|------------------------|---------------------------|------------------|
| T1       | 360,34 ± 10,08 | <b>363,90 (0,98%)</b>  | 369,34 (2,44%)            | 354,44 (-1,66%)  |
| T2       | 334,88 ± 16,75 | <b>312,43(-7,18%)</b>  | 309,72 (-8,13%)           | 217,48 (-53,98%) |
| S1       | 357,56 ± 19,06 | -----                  | <b>365,42 (2,15%)</b>     | 379,43 (5,76%)   |
| S2       | 316,78 ± 30,51 | <b>298,54 (-6,11%)</b> | 293,10 (-8,08%)           | 209,83 (-50,97%) |

Fonte: O autor.

O Método Taguchi não pode prever as propriedades mecânicas da condição S1, pois o Taguchi apresenta a limitação de não poder interpolar ou extrapolar valores fora dos níveis utilizados, i.e., somente é permitido o uso de níveis codificados.

A condição S1 utilizou os valores de temperatura do fundido de 210 °C, temperatura do molde de 65 °C, pressão de compactação de 160 bar e velocidade de injeção de 90 cm<sup>3</sup>/s, sendo que o Taguchi não pode prever devido aos valores da pressão e velocidade de injeção.

Em relação a eficácia na predição das propriedades, o Método Taguchi foi mais preciso do que a Superfície de Resposta e Regressão Linear.

Ao se comparar o Método Taguchi com a Superfície de Resposta, nas condições passíveis de comparação para ambos os métodos (T1,T2 e S2), Método Taguchi foi mais preciso (menor diferença, em módulo) em 11 previsões.

Na segunda comparação, Método Taguchi foi mais preciso em 9 das 12 condições, quando comparado à Regressão Linear.

Ao se comparar Superfície de Resposta e Regressão Linear, a primeira foi mais eficaz em 10 das 16 previsões.

Por fim, ao se comparar os três métodos simultaneamente (exceto a condição S1), o Método Taguchi foi mais preciso em 8 previsões, seguido pela Regressão Linear (3 previsões) e Superfície de Resposta, com apenas 1 mais precisa.

## 5.11 ESTUDO MORFOLÓGICO

Para entender como as condições de injeção afetam a microestrutura, que consequentemente, afeta as propriedades mecânicas do material, o material foi submetido a Microscopia Eletrônica de Varredura a fim de observar diferenças morfológicas nas diferentes condições.

Essas microscopias foram realizadas em duas diferentes situações. Primeiramente foram feitas as microscopias da região de fratura dos corpos de prova de impacto instrumentado. Num segundo momento, corpos de prova injetados foram submetidos a fratura criogênica, a fim de se observar a dispersão dos domínios elastoméricos, nas diferentes condições de injeção.

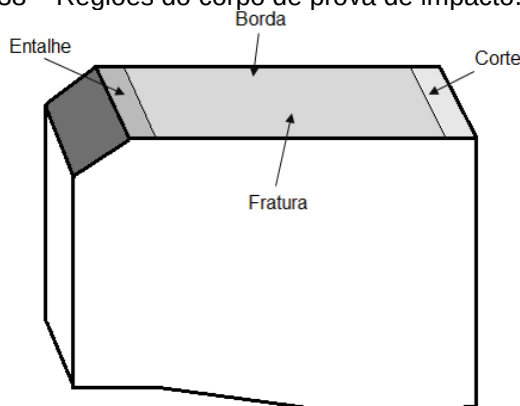
### 5.11.1 Morfologia dos corpos de prova fraturados por impacto

Os corpos de prova de impacto, após fazer o ensaio propriamente dito, foram separadamente avaliados no MEV. Foram usados um corpo de prova de cada condição a fim de se avaliar se havia diferenças morfológicas, e quais era elas, com o objetivo de relacionar a estrutura com as diferentes propriedades obtidas.

Após o ensaio de impacto, a fratura do corpo não foi completa, sendo necessário cortar a parte final do corpo como mostrado na figura abaixo.

Foram analisadas algumas regiões diferentes, sendo elas a região entre o entalhe e o início da fratura, a região central da fratura, região próxima ao corte e, por fim, a região na região central da fratura, mas próxima a borda da peça, como demonstrado na figura 38.

Figura 38 – Regiões do corpo de prova de impacto.



Fonte: O autor.

Usando essas 4 regiões distintas, pode-se avaliar as diferenças e semelhanças microestruturais, tanto em diferentes condições de injeção como entre diferentes regiões. As figuras 24 – 32 mostram as micrografias obtidas por MEV em diferentes regiões das amostras, sendo que foram obtidas 4 microscopias para cada condição de injeção da matriz Taguchi.

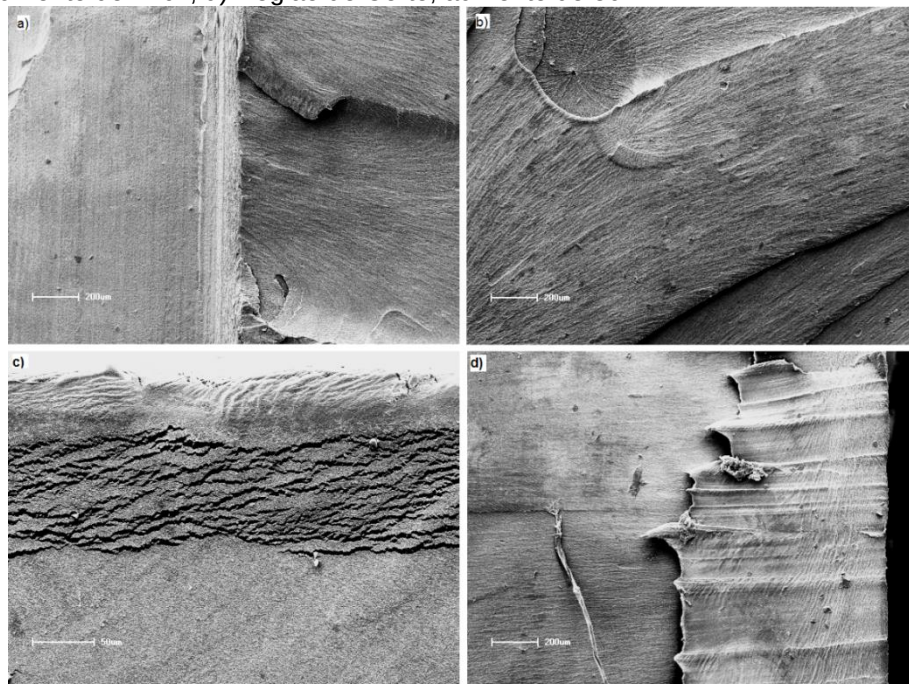
Em 8 condições de injeção (exceto a condição G), não há diferenças visíveis ao longo da fratura por impacto. A condição G apresentou graves defeitos, tais como vazios, cisalhamento, entre outros, que como consequência reduziu a Resistência ao Impacto para os mais baixos valores das condições testadas.

Ocorreu também a presença de trincas paralelas na borda superior, podendo ser observadas em quase todas as condições. Elas são provocadas por cisalhamento durante a fratura produzida pelo martelo, pois enquanto o centro da amostra sofre deformação, a superfície fica estática [160].

As trincas são resultado do escoamento por cisalhamento. Esse escoamento é um mecanismo de deformação plástica não-dilatacional (sem alteração de volume). Portanto, a temperatura ambiente, a região de fratura possui características tipicamente dúcteis com a presença de regiões de escoamento por cisalhamento decorrente de “esbranquiçamento” sob tensão [160].

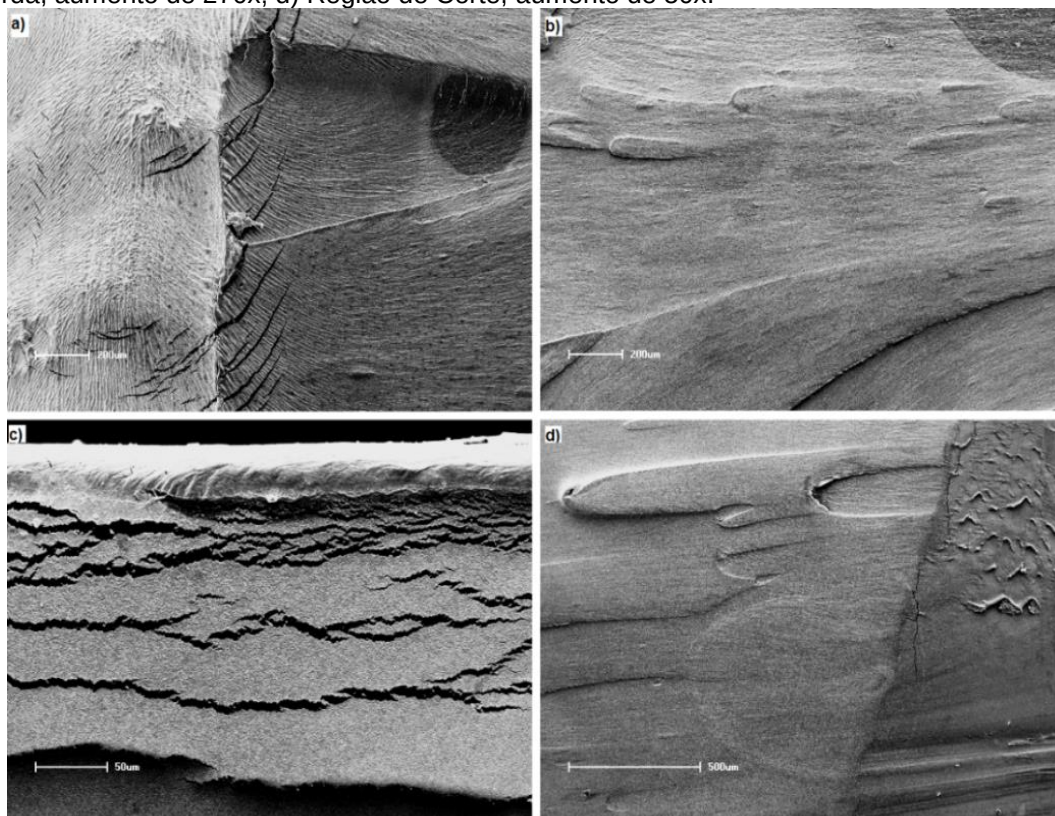
Outro ponto importante é o formato das linhas de fratura, como na figura 25 b). A fratura dúctil apresenta-se através de regiões cisalhadas enquanto na fratura frágil são observadas superfícies lisas ou espelhadas decorrentes de possíveis clivagens.

Figura 39 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção A. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x.



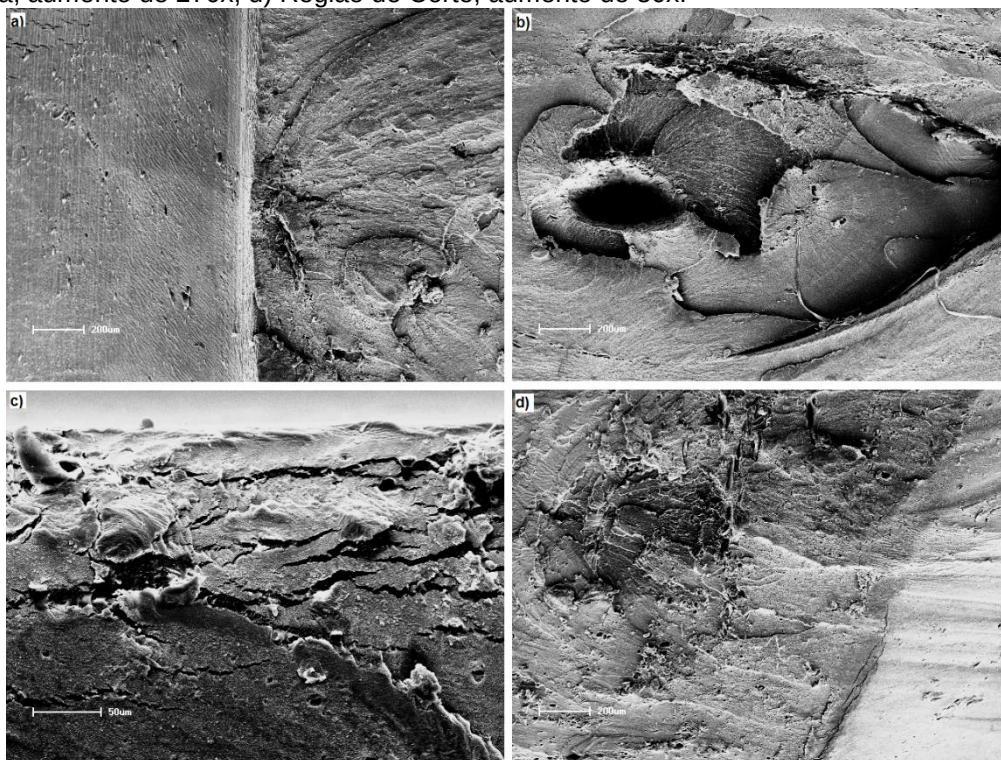
Fonte: O autor.

Figura 40 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção B. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x.



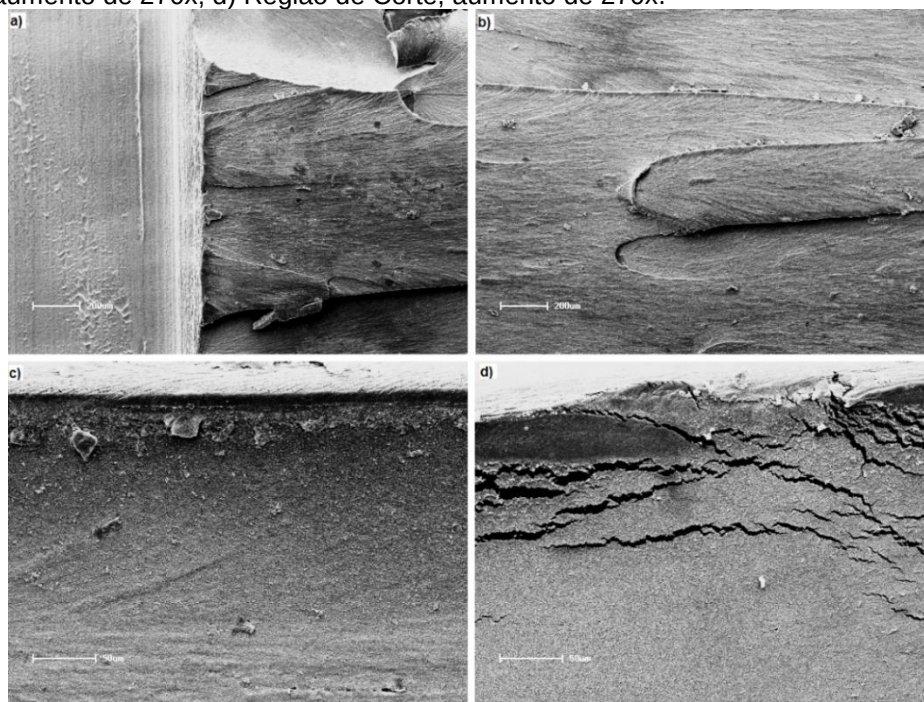
Fonte: O autor.

Figura 41 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção C. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x.



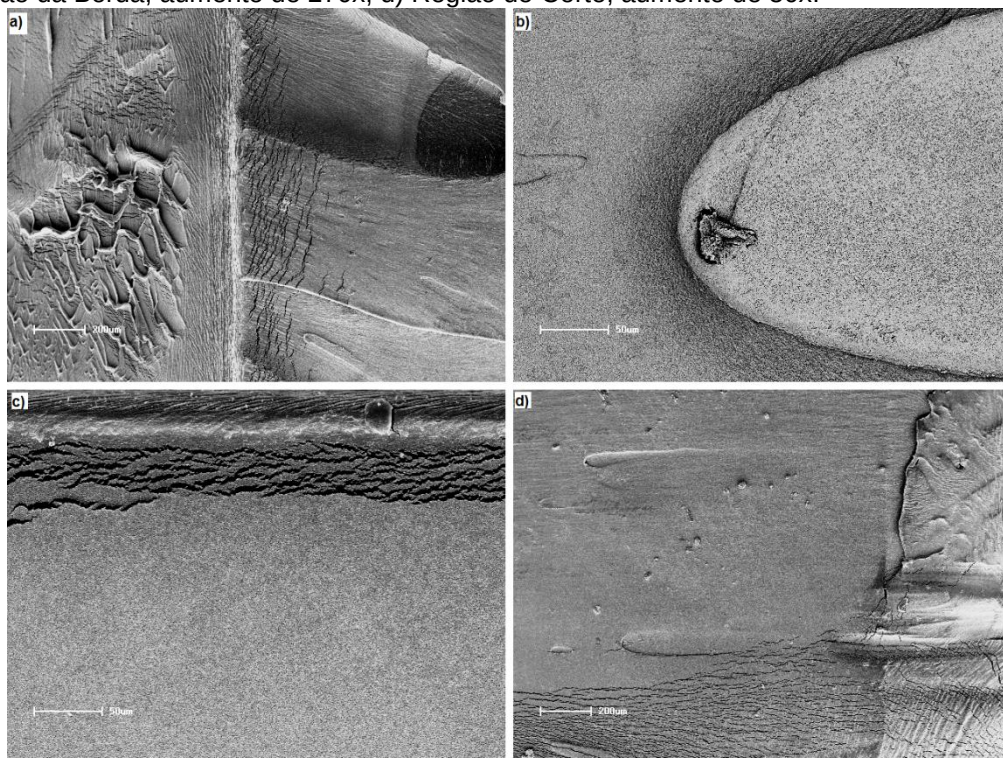
Fonte: O autor.

Figura 42 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção D. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 270x.



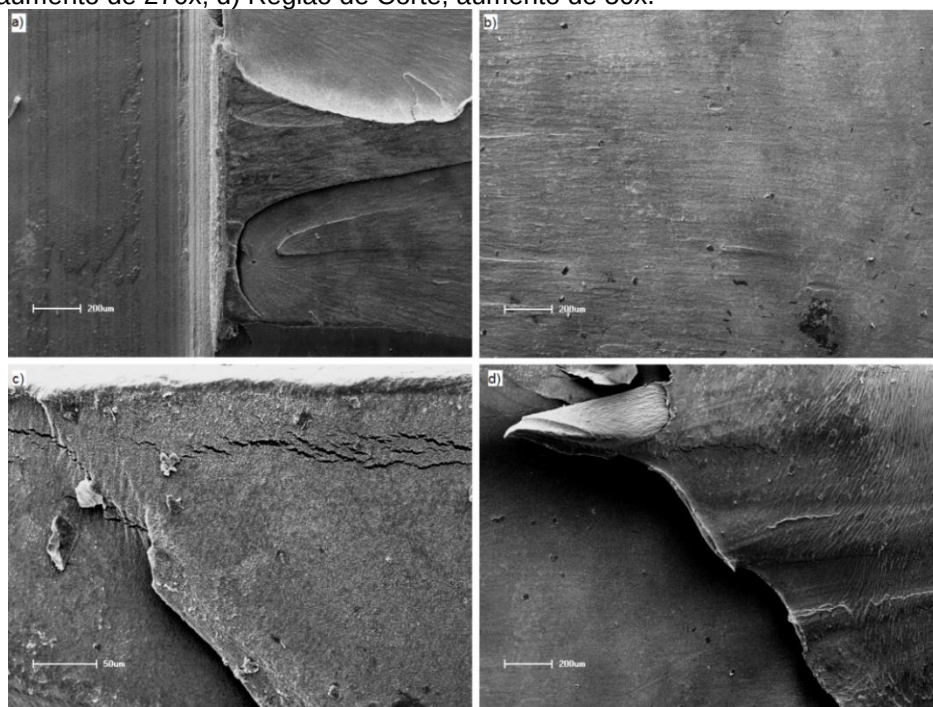
Fonte: O autor.

Figura 43 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção E. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 270x com BS; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x.



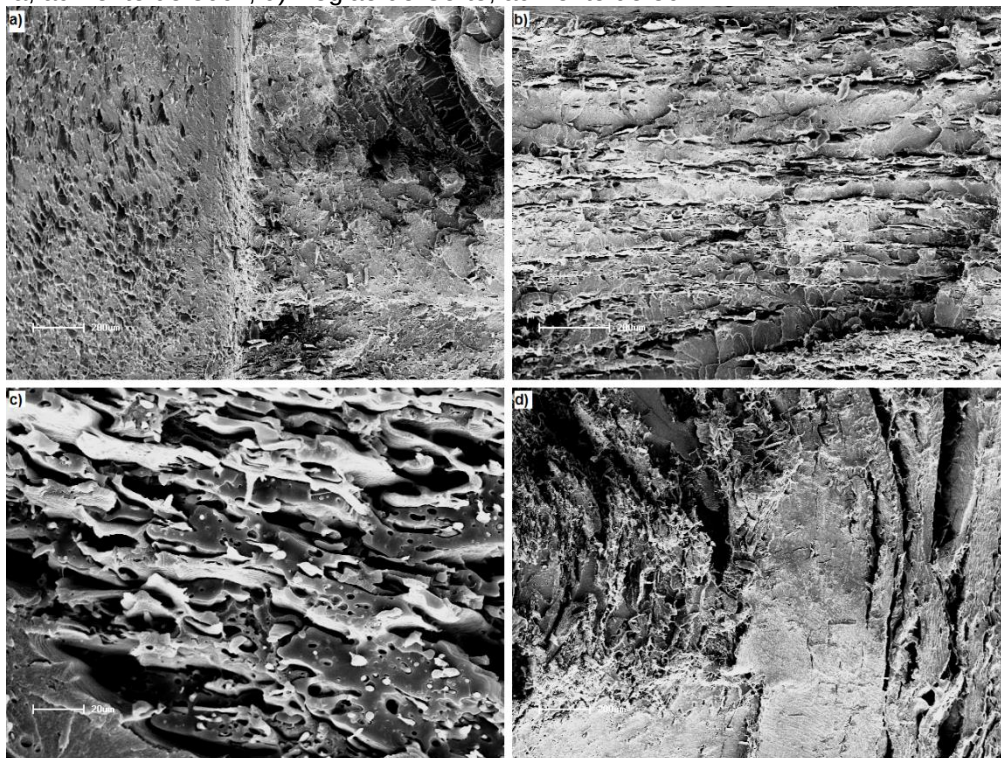
Fonte: O autor.

Figura 44 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção F. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x.



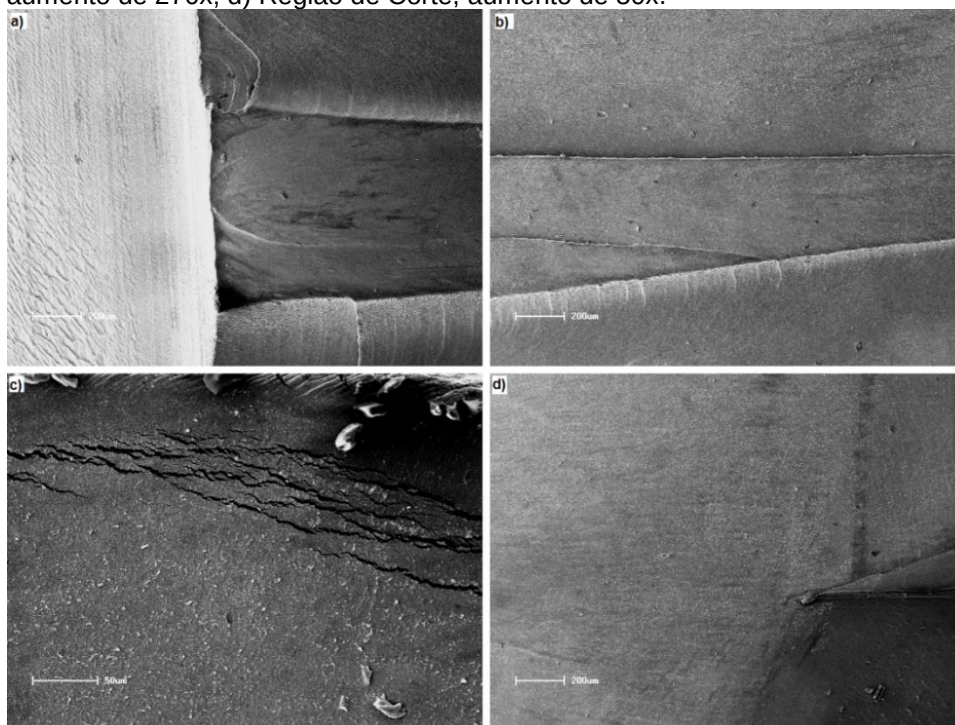
Fonte: O autor.

Figura 45 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção G. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 70x; c) Região da Fratura, aumento de 500x; d) Região de Corte, aumento de 50x.



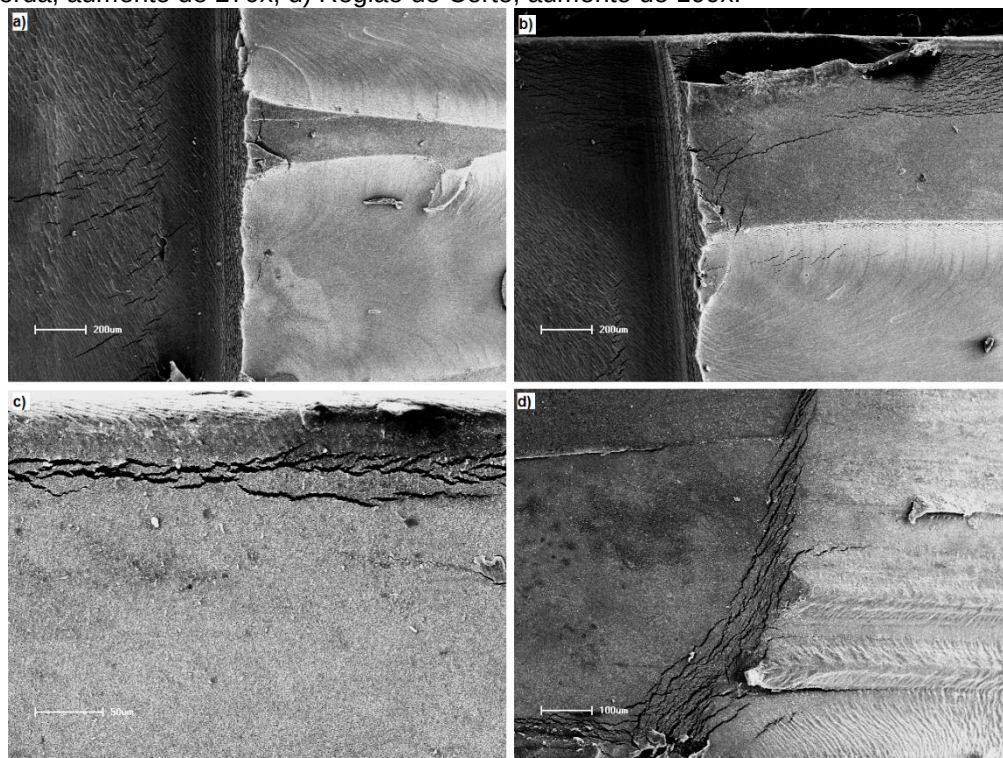
Fonte: O autor.

Figura 46 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção H. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região da Fratura, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 50x.



Fonte: O autor.

Figura 47 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostra da condição de injeção I. a) Região do Entalhe, aumento de 50x; b) Região do Entalhe-Borda, aumento de 50x; c) Região da Borda, aumento de 270x; d) Região de Corte, aumento de 100x.



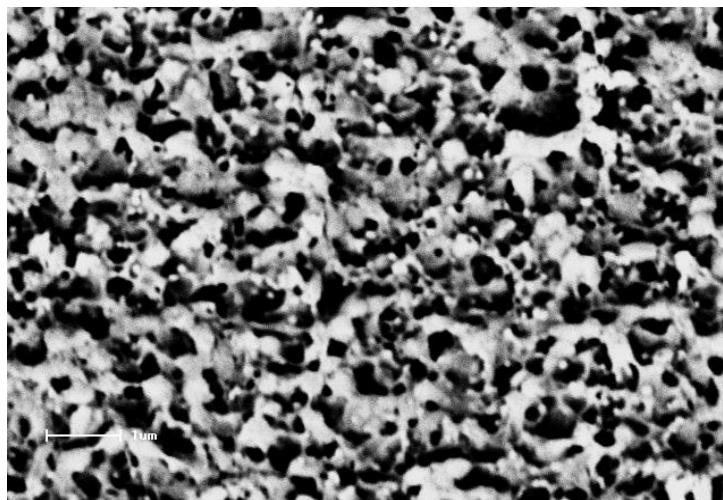
Fonte: O autor.

#### 5.11.2 Medição dos domínios elastoméricos

Usando imagens obtidas através do MEV, foi avaliado o tamanho dos domínios elastoméricos. Primeiramente as amostras das diferentes condições de injeção foram fraturadas e em seguidas atacadas pela solução sulfocrômica, a qual promoveu um ataque químico seletivo, removendo preferencialmente o Polibutadieno.

A microestrutura que se apresentou foi de uma matriz de Acrilonitrila-Estireno (SAN) com uma série de orifícios escuros, os quais representam as partículas de borracha, como apresentado na figura 48.

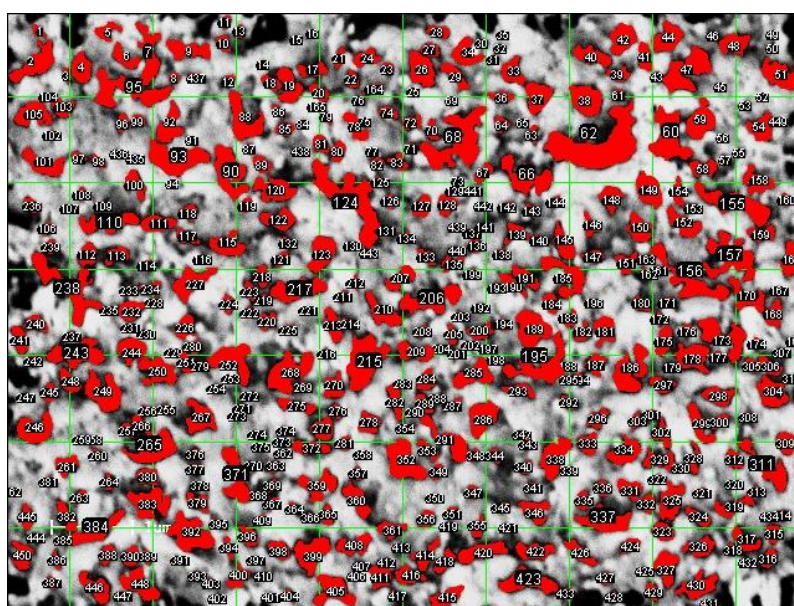
Figura 48 — Microscopia Eletrônica de Varredura do ABS, Condição de injeção A. Aumento de 10.000 x. Ataque com Sulfocromica. A parte mais clara representa a matriz e as partes escuras os orifícios, referentes ao Polibutadieno.



Fonte: O autor.

Usando análise de imagem, os orifícios foram contados manualmente, identificados (como mostrado na figura 48) e por fim medidos em relação a sua área. Para melhor precisão dos resultados, os domínios elastoméricos nas bordas foram desconsiderados, pois se desconhece seu tamanho real.

Figura 49 — Análise de Imagem da amostra de ABS da condição A, a partir da imagem de MEV. As regiões em vermelho representam os domínios elastoméricos. Aumento de 10.000 x e ataque com sulfocromica.



Fonte: O autor.

A partir dos dados obtidos da contagem e medição dos domínios elastoméricos, foram feitos alguns cálculos, como contagem, média normal, média ponderada e desvio padrão, exibidos na tabela abaixo.

Usando os valores obtidos, foi calculado um índice, denominado Índice de Dispersão de Butadieno. Valores próximos de 1, indicam boa dispersão

Equação 20 – Cálculo do Índice de Dispersão de Borracha.

$$IDB = \frac{\text{Média Ponderada}}{\text{Média normal}}$$

Tabela 36 – Resultados gerais da contagem de domínios elastoméricos do ABS HI 10, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | Contagem | Média<br>( $\mu\text{m}^2$ ) | Desvio<br>Padrão | Média ponderada<br>( $\mu\text{m}^2$ ) | IDB  | %PB   | RI     |
|----------|----------|------------------------------|------------------|----------------------------------------|------|-------|--------|
| A        | 450      | 0,037                        | 0,044            | 0,043                                  | 1,18 | 24,85 | 334,46 |
| B        | 474      | 0,026                        | 0,033            | 0,031                                  | 1,17 | 18,39 | 371,77 |
| C        | 287      | 0,059                        | 0,079            | 0,072                                  | 1,21 | 25,27 | 360,16 |
| D        | 349      | 0,050                        | 0,067            | 0,059                                  | 1,18 | 26,04 | 355,56 |
| E        | 191      | 0,069                        | 0,078            | 0,089                                  | 1,28 | 19,67 | 352,25 |
| F        | 284      | 0,053                        | 0,058            | 0,065                                  | 1,23 | 22,46 | 354,41 |
| G        | 309      | 0,055                        | 0,066            | 0,067                                  | 1,22 | 25,37 | 295,54 |
| H        | 422      | 0,025                        | 0,029            | 0,030                                  | 1,19 | 15,75 | 328,90 |
| I        | 330      | 0,041                        | 0,044            | 0,048                                  | 1,18 | 20,19 | 332,32 |

Fonte: O autor.

A partir da análise de imagem, foi calculada a porcentagem em massa do Polibutadieno no ABS HI-10. A partir da contagem foi obtido que há cerca de 22% ( $15,85 \mu\text{m}^2$ ) de Polibutadieno (PB) em área no ABS. A densidade da fase dispersa (PB) e da matriz (estireno-acrilonitrila ou SAN) são diferentes, portanto é necessário fazer os cálculos de massa do PB e do SAN:

Equação 21 – Cálculo da massa de Polibutadieno (PB) e Estireno-Acrilonitrila (SAN) no ABS.

$$M_{PB} = \rho_{PB} \times V_{PB}$$

$$M_{SAN} = \rho_{SAN} \times (V_T - V_{PB})$$

Onde:

$M_{PB}$  – massa de Polibutadieno, em gramas;

$\rho_{PB}$  – densidade do Polibutadieno ( $0,92 \text{ g/cm}^3$ );

$V_{PB}$  – Área composta de Polibutadieno ( $15,85 \mu\text{m}^2$ );

$M_{SAN}$  – massa de Estireno-Acrilonitrila, em gramas;

$\rho_{SAN}$  – densidade do Polibutadieno ( $1,03 \text{ g/cm}^3$ );

$V_T$  – Área total ( $67 \text{ }\mu\text{m}^2$ ).

A partir dos dados, a percentagem de PB no ABS foi calculada por:

Equação 22 – Cálculo da porcentagem de massa de Polibutadieno (PB) no ABS.

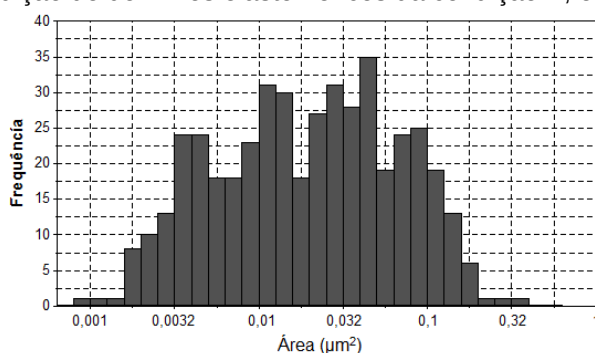
$$\% PB = \frac{M_{PB}}{M_{PB} + M_{SAN}}$$

O resultado obtido foi que há 21,7 % de massa de Polibutadieno no ABS HI-10. Infelizmente o resultado não pode ser confirmado via análise química.

Além disso, foram plotados a distribuição de tamanho dos domínios, no intuito de se verificar a dispersão do Polibutadieno na matriz. Devido à grande variação de tamanho de área (chegando a 4 ordens de grandeza) e seus valores abaixo de 1 micra quadrado, foi utilizado os valores de log (Área).

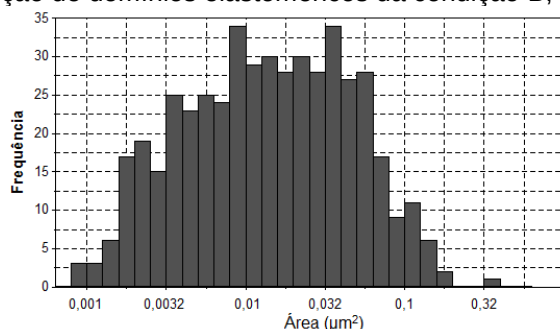
Os gráficos 19-27 mostram a distribuição do PB na matriz polimérica do ABS. A maior parte dos domínios fica em tamanhos até  $0,05 \text{ }\mu\text{m}^2$ , sendo que todas as condições apresentaram uma distribuição do tipo lognormal, onde a maior parte da dos domínios fica em baixos valores.

Gráfico 19 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição A, em escala logarítmica.



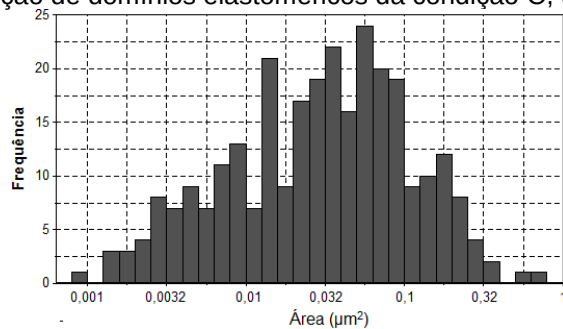
Fonte: O autor.

Gráfico 20 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição B, em escala logarítmica.



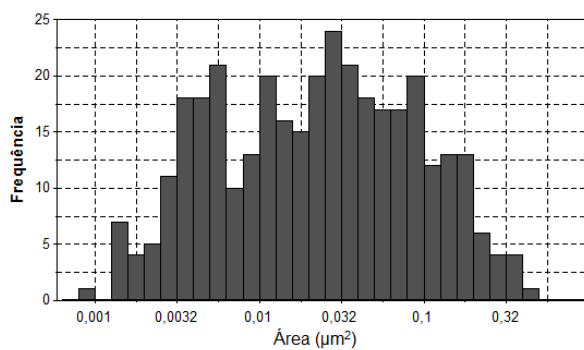
Fonte: O autor.

Gráfico 21 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição C, em escala logarítmica.



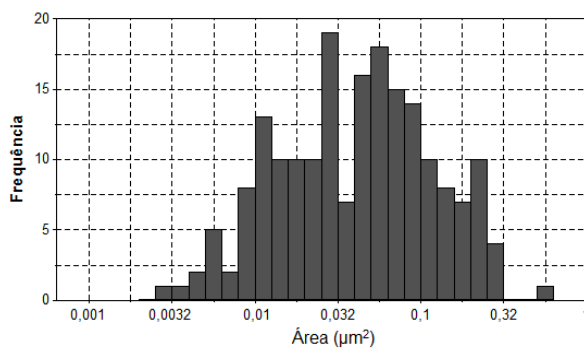
Fonte: O autor.

Gráfico 22 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição D, em escala logarítmica.



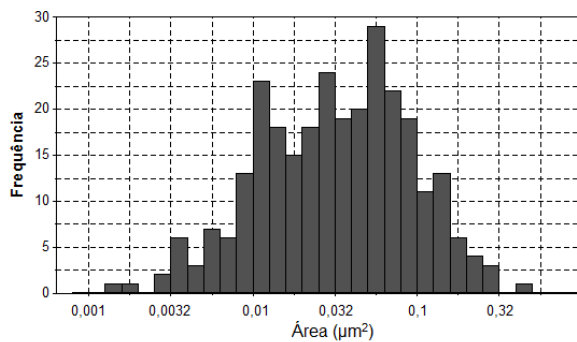
Fonte: O autor.

Gráfico 23 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição E, em escala logarítmica.



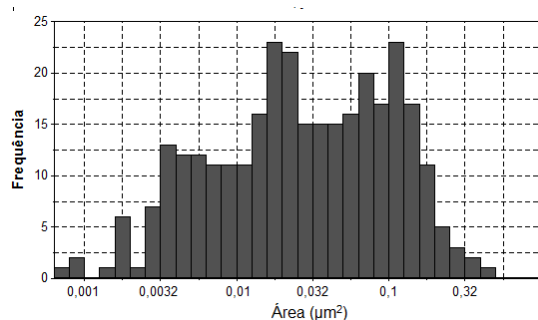
Fonte: O autor.

Gráfico 24 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição F, em escala logarítmica.



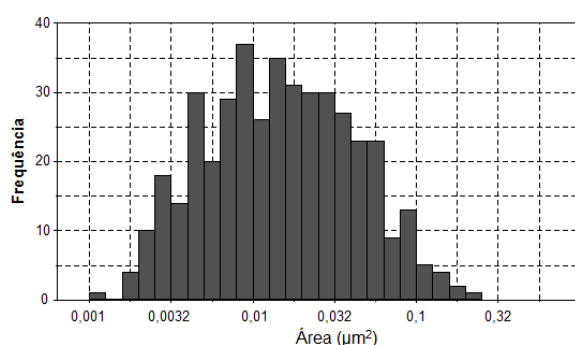
Fonte: O autor.

Gráfico 25 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição G, em escala logarítmica.



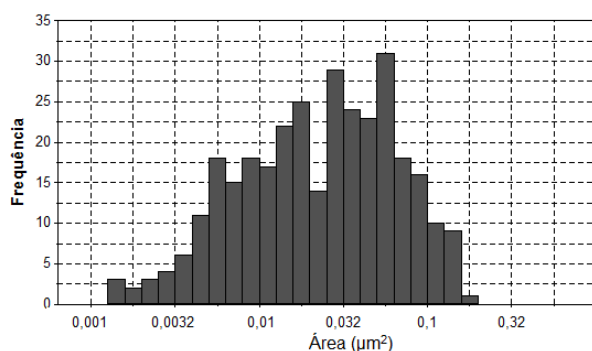
Fonte: O autor.

Gráfico 26 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição H, em escala logarítmica.



Fonte: O autor.

Gráfico 27 – Distribuição de domínios elastoméricos da condição I, em escala logarítmica.



Fonte: O autor.

Através dos gráficos de dispersão e dos dados demonstrados na tabela, pode-se notar que houve uma leve variação da dispersão entre as diferentes condições, além de uma diferença quanto ao tamanho médio e quantidade de aglomerados.

Quanto ao tamanho dos domínios elastoméricos, a maior parte do tamanho fica entre 0,01 e 0,1 micra quadrada, mas seu tamanho pode variar entre  $2 \times 10^{-4}$  e 0,6 micra quadrada. A condição C apresentou uma quantidade incomum de aglomerados, se for considerar a quantidade total de domínios

elastoméricos apresentados, mas esses aglomerados aparentemente não interferiram na Resistência ao Impacto.

Quanto a dispersão geral, as condições A, B, D e I apresentaram índices de dispersão bem próximos, das quais B e D são duas condições que apresentaram altos valores de Resistência ao Impacto (RI), quando comparada às nove condições testadas. Isso é um indicio de que a dispersão possui certa influência nas propriedades mecânicas de impacto.

Contudo, a condição C, a qual apresentou uma quantidade anormal de aglomerados e baixa contagem de domínios elastoméricos, além de um índice IDB alto, apresentou alta Resistência ao Impacto (a segunda maior das nove condições de injeção testadas). Portanto, pode-se inferir que a distribuição dos domínios e seu tamanho tem influência limitada na Resistência ao Impacto.

## 5.12 TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES

O tratamento de alívio de tensões tem por objetivo reduzir as tensões internas do material, as quais podem ocorrer por várias origens. No caso do processo de injeção e dos corpos de prova aqui utilizados, a principal causa das tensões residuais é de origem térmica, devido a diferença de temperatura do polímero fundido injetado e das paredes do molde.

Foram aplicados diversos Testes de Tukey, entre os valores com e sem alívio de tensões, no intuito de avaliar se as diferenças das propriedades com e sem alívio de tensões são significativas, isto é, não foram causadas ao acaso.

Após o tratamento térmico ter sido realizado, foi observado algumas características importantes que devem ser citadas e que não eram esperadas antes de avaliar o efeito do mesmo nas propriedades mecânicas. A figura 35 mostra dois corpos de prova, um submetido ao alívio de tensões e outro não.

Figura 50 – Corpos de prova da condição I, sem alívio de tensões (superior) e com alívio de tensões (inferior).



Fonte: O autor.

Como pode-se notar, há uma grande variação nas dimensões, as quais são visíveis a olho nu. O segundo ponto é referente ao escurecimento dos corpos de prova, devido principalmente à degradação térmica, sendo um indicio de que os parâmetros do tratamento térmico (100°C por 24 horas) foram muito elevados. Em poucos corpos de prova também foram observadas algumas trincas, que foram apenas superficiais, com baixa influência nas propriedades mecânicas.

Nos próximos tópicos é demonstrado o efeito do tratamento de alívio de tensões nas propriedades de Resistência sob Tração, Módulo Elástico e Resistência ao Impacto e no parâmetro de Força Máxima sob Impacto.

#### 5.12.1 Efeito na Resistência sob Tração

Na tabela 37 é demonstrado o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões na Resistência sob Tração (RT). Para tal foi comparado os valores de

RT obtidos nos ensaios de tração (5.3) com os corpos de prova submetidos ao tratamento.

Tabela 37 – Propriedade de Resistência sob Tração (RT), em Mpa, com e sem alívio de tensões, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | RT sem alívio  | RT com alívio  | Diferença | Diferença significativa |
|----------|----------------|----------------|-----------|-------------------------|
| A        | 32,267 ± 0,518 | 32,894 ± 0,567 | 1,94 %    | Sim                     |
| B        | 34,397 ± 0,329 | 33,212 ± 0,533 | - 3,45 %  | Sim                     |
| C        | 33,292 ± 0,267 | 32,051 ± 0,584 | - 3,73 %  | Sim                     |
| D        | 34,503 ± 0,425 | 32,036 ± 0,792 | - 7,15 %  | Sim                     |
| E        | 32,905 ± 0,410 | 31,792 ± 0,432 | - 3,38 %  | Sim                     |
| F        | 34,856 ± 0,450 | 32,050 ± 0,749 | - 8,05 %  | Sim                     |
| G        | 33,721 ± 0,754 | 33,548 ± 0,545 | - 0,51 %  | Não                     |
| H        | 33,385 ± 0,267 | 32,412 ± 0,650 | - 2,91 %  | Sim                     |
| I        | 34,790 ± 0,128 | 32,656 ± 0,998 | - 6,13 %  | Sim                     |

Fonte: O autor.

Na Resistência sob Tração, o alívio de tensões provocou uma redução da Resistência sob Tração média em oito das nove condições (a exceção foi a condição A, a qual apresentou um leve aumento). Por sua vez, os testes de Tukey demonstraram que a diferença foi significativa em oito condições de injeção, sendo a condição G a única exceção.

Quando o polímero sofre alívio de tensões, há uma tendência de ocorrer redução na Resistência sob Tração, conforme observado por Kim [157], Takayami [165] e Bai [166]. Essa redução ocorre tanto em polímeros cristalinos, como o PP quanto em polímeros amorfos, como o ABS.

#### 5.12.2 Efeito no Módulo Elástico

A tabela 38 apresenta o efeito do alívio de tensões no Módulo Elástico. O tratamento térmico provocou aumento dos valores médios do Módulo Elástico em sete das diferentes condições de injeção, o qual variou de cerca de 1% (condição B) até 34% (condição C).

Tabela 38 – Propriedade Módulo Elástico (E), em Mpa, com e sem alívio de tensões, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | E sem alívio      | E com alívio     | Diferença | Diferença significativa |
|----------|-------------------|------------------|-----------|-------------------------|
| A        | 886,594 ± 77,073  | 1021,65 ± 42,877 | 15,23 %   | Sim                     |
| B        | 929,850 ± 92,049  | 937,465 ± 61,789 | 0,82 %    | Não                     |
| C        | 735,256 ± 141,940 | 986,714 ± 58,930 | 34,20 %   | Sim                     |
| D        | 958,969 ± 37,182  | 1008,45 ± 53,635 | 5,16 %    | Não                     |
| E        | 800,744 ± 54,634  | 973,532 ± 37,383 | 21,58 %   | Sim                     |
| F        | 996,826 ± 102,866 | 949,692 ± 54,250 | - 4,73 %  | Não                     |
| G        | 953,188 ± 69,141  | 982,19 ± 47,030  | 3,04 %    | Não                     |
| H        | 892,037 ± 87,409  | 974,83 ± 37,554  | 9,28 %    | Sim                     |
| I        | 1006,794 ± 39,375 | 979,436 ± 46,788 | -2,72 %   | Não                     |

Fonte: O autor.

As condições F e I, que usaram temperaturas do fundido de 240 °C, apresentaram leves reduções. Diferente do caso da Resistência sob tração (5.13.1), os testes de Tukey apontaram diferenças significativas em apenas quatro condições: A, C, E e H.

O efeito do alívio de tensões no Módulo Elástico varia conforme o material. No trabalho de Kim, Yoon e Xie [157], o alívio de tensões promove uma redução no Módulo Elástico da blenda ABS/PMMA e ABS/PC/PMMA, enquanto no trabalho de Takayama, Todob e Tsujic [165], as blendas de PLA apresentaram um leve aumento do Módulo Elástico.

### 5.12.3 Efeito na Força Máxima sob Impacto

Na tabela 39, é demonstrado o efeito do tratamento térmico no parâmetro de Força Máxima sob Impacto.

Tabela 39 – Parâmetro Força Máxima sob Impacto, em N, com e sem alívio de tensões, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | Fmax sem alívio  | Fmax com alívio  | Diferença | Diferença significativa |
|----------|------------------|------------------|-----------|-------------------------|
| A        | 276,757 ± 6,891  | 268,091 ± 4,877  | - 3,13 %  | Sim                     |
| B        | 282,405 ± 7,959  | 270,971 ± 10,830 | - 4,05 %  | Sim                     |
| C        | 275,783 ± 10,207 | 258,191 ± 14,315 | - 6,38 %  | Sim                     |
| D        | 283,565 ± 7,669  | 266,694 ± 6,860  | - 5,95 %  | Sim                     |
| E        | 274,735 ± 11,470 | 271,202 ± 11,252 | - 1,29 %  | Sim                     |
| F        | 273,342 ± 4,294  | 273,855 ± 13,787 | 0,19 %    | Não                     |
| G        | 258,994 ± 17,297 | 276,326 ± 25,075 | 6,69 %    | Não                     |
| H        | 266,485 ± 11,268 | 269,731 ± 11,511 | 1,22 %    | Não                     |
| I        | 264,723 ± 5,236  | 277,441 ± 19,093 | 4,80 %    | Não                     |

Fonte: O autor.

O efeito do tratamento de alívio de tensões não ficou muito claro na Força Máxima. Em cinco condições de injeção ocorreu uma redução de até 6,4 % nos valores médios, e nas quatro condições restantes ocorreram aumentos entre 0,19 % e 6,69%.

Os testes de Tukey apontaram que nas condições A, B, C, D e E, ocorreu diferença significativa nos valores de Força Máxima devido ao tratamento de alívio de tensões.

Um ponto importante para se observar é que os valores desse parâmetro que apresentaram baixa variação de seus valores médios nas diferentes condições de injeção, não sendo muito sensível às condições de processo.

#### 5.12.4 Efeito na Resistência ao Impacto

O tratamento de alívio de tensões apresenta grande importância na propriedade de Resistência ao Impacto, que é uma das propriedades mais importantes no caso do ABS. Na tabela 40, é demonstrado o efeito do alívio de tensões na Resistência ao Impacto.

Tabela 40—Propriedade de Resistência ao Impacto (RI), em J/m, com e sem alívio de tensões, nas diferentes condições de injeção.

| Condição | RI sem alívio    | RI com alívio    | Diferença | Diferença significativa |
|----------|------------------|------------------|-----------|-------------------------|
| A        | 334,458 ± 23,898 | 366,485 ± 11,083 | 9,98 %    | Sim                     |
| B        | 361,767 ± 17,653 | 370,567 ± 19,008 | 2,43 %    | Não                     |
| C        | 360,161 ± 20,837 | 373,686 ± 27,512 | 3,76 %    | Não                     |
| D        | 355,560 ± 14,718 | 349,852 ± 31,521 | - 1,61 %  | Não                     |
| E        | 352,253 ± 11,398 | 367,957 ± 54,250 | 4,46 %    | Não                     |
| F        | 352,723 ± 10,572 | 361,436 ± 17,612 | 2,47 %    | Não                     |
| G        | 295,536 ± 42,681 | 311,793 ± 26,300 | 5,50 %    | Não                     |
| H        | 328,924 ± 13,745 | 322,28 ± 19,001  | - 2,02 %  | Não                     |
| I        | 332,314 ± 16,038 | 336,54 ± 29,410  | 1,27 %    | Não                     |

Fonte: O autor.

Ao se observar os resultados obtidos, o tratamento de alívio de tensões promoveu um aumento dos valores médios de Resistência ao Impacto em sete diferentes condições.

Por outro lado, os testes de Tukey realizados demonstram que das nove condições de injeção, apenas a condição A apresentou uma diferença significativa entre os valores com e sem alívio de tensões.

O aumento não foi muito pronunciado em relação aos valores médios; entretanto pontualmente diversas amostras apresentaram valores de Resistência ao Impacto (RI) superiores a 400 J/m.

O alívio de tensões é utilizado comumente para melhorar a Resistência ao Impacto dos polímeros. Conforme visto no trabalho de Takayama [165] e Bay [166], o alívio de tensões promove uma elevação da RI ao reduzir tensões internas, responsáveis pela fratura precoce sob impacto.

Outro ponto importante é que quanto maior a temperatura do alívio, menos é o tempo necessário do mesmo. Portanto, utilizar 100 °C por 24 horas foi prejudicial na RI do ABS HI 10, sendo necessário uma redução do tempo ou da temperatura do alívio para que o tratamento térmico obtenha o efeito esperado.

### 5.13 RELAÇÃO ENTRE PROCESSAMENTO, MORFOLOGIA E PROPRIEDADES

É conhecido que as condições de injeção afetam a morfologia/estrutura do polímero injetado, como na orientação, qualidade, etc. Por sua vez, morfologias distintas geram respostas (propriedades) diferentes do material.

Nesse tópico, serão feitas algumas observações pertinentes à relação entre processamento, morfologia e propriedades. Na tabela abaixo é demonstrado o panorama geral dos dados obtidos ao longo desse trabalho.

Tabela 41 – Valores das condições de processamento, morfologia e propriedades mecânicas do ABS HI-10.

|   | Processamento  |                |     |       | Morfologia      |                  |      |       | Propriedades |        |       |
|---|----------------|----------------|-----|-------|-----------------|------------------|------|-------|--------------|--------|-------|
|   | T <sub>F</sub> | T <sub>M</sub> | P   | V     | M <sub>PB</sub> | MP <sub>PB</sub> | IDB  | Massa | RT           | RI     | BI    |
|   | °C             | °C             | bar | Cm3/s | µm2             | µm2              | *    | g     | MPa          | J/m    | %     |
| A | 210            | 45             | 150 | 50    | 0,037           | 0,043            | 1,18 | 7,64  | 32,27        | 334,46 | 67,82 |
| B | 210            | 55             | 200 | 80    | 0,029           | 0,031            | 1,17 | 7,98  | 34,40        | 361,77 | 63,58 |
| C | 210            | 65             | 250 | 110   | 0,059           | 0,072            | 1,21 | 8,02  | 33,29        | 360,16 | 66,04 |
| D | 225            | 45             | 200 | 110   | 0,050           | 0,059            | 1,18 | 8,01  | 34,50        | 355,56 | 67,49 |
| E | 225            | 55             | 250 | 50    | 0,069           | 0,089            | 1,28 | 7,94  | 32,91        | 352,25 | 60,96 |
| F | 225            | 65             | 150 | 80    | 0,053           | 0,065            | 1,23 | 8,04  | 34,86        | 352,72 | 64,78 |
| G | 240            | 45             | 250 | 80    | 0,055           | 0,067            | 1,22 | 8,06  | 33,72        | 295,54 | 59,60 |
| H | 240            | 55             | 150 | 110   | 0,025           | 0,030            | 1,19 | 7,95  | 33,39        | 328,92 | 63,45 |
| I | 240            | 65             | 200 | 50    | 0,041           | 0,048            | 1,18 | 8,00  | 34,79        | 332,31 | 58,16 |

Nota: T<sub>F</sub> (Temperatura do fundido), T<sub>M</sub> (Temperatura do molde), P (pressão de compactação), V (Velocidade de injeção), MPPB (Média ponderada de tamanho), IDB (Índice de dispersão), RT (Resistência sob Tração), RI (Resistência ao Impacto), BI Índice de fragilidade).

Fonte: O autor.

Após o tratamento dos dados, foram escolhidas e injetadas 4 novas condições de injeção, que visavam a verificação da precisão dos modelos, tanto do Método Taguchi Ortogonal quanto da Superfície de Resposta. As condições escolhidas, assim como os resultados das propriedades mecânicas obtidas são demonstradas na tabela 42.

Tabela 42 – Propriedades mecânicas das condições otimizadas.

| Condição | T <sub>F</sub> | T <sub>M</sub> | P   | V  | RT    | E       | F <sub>MAX</sub> | RI     |
|----------|----------------|----------------|-----|----|-------|---------|------------------|--------|
| T1       | 225            | 65             | 200 | 80 | 33,48 | 1094,19 | 273,61           | 360,34 |
| T2       | 240            | 45             | 200 | 50 | 33,02 | 1073,07 | 275,10           | 334,88 |
| S1       | 210            | 65             | 160 | 90 | 34,38 | 1082,63 | 276,60           | 357,56 |
| S2       | 240            | 45             | 250 | 50 | 33,69 | 1095,64 | 271,77           | 316,78 |

Fonte: O autor.

A partir dos dados obtidos, foram feitas algumas observações adicionais, com relação ao efeito da morfologia e condições de processamento nas propriedades mecânicas do ABS injetado.

### 5.13.1 Condições otimizadas

O arranjo ortogonal do Método Taguchi é eficaz na redução do número de experimentos, cobrindo uma ampla combinação de parâmetros e níveis com pequena quantidade de experimentos. Ao se observar a matriz ortogonal utilizada nesse trabalho (do tipo L9, com 4 parâmetros e 3 níveis), pode-se notar que ao comparar as 9 condições, nenhuma delas partilha dois ou mais parâmetros com os mesmos valores.

Porém, ao se injetar as 4 condições de injeção adicionais (tópico 5.10), algumas considerações podem ser realizadas. A primeira delas é referente às condições F e T1.

Tabela 43 – Comparação entres condições F e T1.

| Condição | T <sub>F</sub> | T <sub>M</sub> | P          | V  | RT    | RI     |
|----------|----------------|----------------|------------|----|-------|--------|
| F        | 225            | 65             | <b>150</b> | 80 | 34,86 | 352,72 |
| T1       | 225            | 65             | <b>200</b> | 80 | 33,48 | 360,34 |

Fonte: O autor.

A única diferença entre essas duas condições é em relação à pressão de compactação. Segundo as predições do método Taguchi e de Superfície de Resposta, o uso de pressão de compactação de 200 bar resultaria em aumento na Resistência sob Tração e um leve aumento na Resistência ao Impacto (RI).

O aumento da RI foi observado, porém a RT apresentou uma queda de 1,4 MPa, sendo que era esperado pelos menos 1 MPa de aumento. Apesar do resultado ter sido inesperado, esse fato reforçou que a pressão de compactação é realmente importante na Resistência sob Tração.

A segunda comparação observada foi em relação às condições I e T2, demonstradas na tabela abaixo.

Tabela 44 – Comparação entres condições I e T2.

| Condição | T <sub>F</sub> | T <sub>M</sub> | P   | V  | RT    | RI     |
|----------|----------------|----------------|-----|----|-------|--------|
| I        | 240            | <b>65</b>      | 200 | 50 | 34,79 | 332,91 |
| T2       | 240            | <b>45</b>      | 200 | 50 | 33,02 | 334,88 |

Fonte: O autor.

A diferença entre a condição I e T2 é a temperatura do molde utilizada. Tanto o Método Taguchi quanto a Superfície de Resposta previram que haveria uma redução na RT e na RI, quando comparada à condição I.

A redução da RT realmente ocorreu, mas foi mais acentuada do que o previsto pelos modelos, enquanto a RI praticamente não se alterou. A razão dessa queda de quase 2 MPa no valor médio de RT pode ser associada principalmente às tensões residuais de origem térmica, induzida pela diferença de temperatura entre o polímero fundido e as paredes do molde, visto que quanto maior essa diferença, mais brusco é o resfriamento.

Essa redução na RT pode ser observada em outras condições (G e S2). Ao se usar diferenças de 195 °C entre fundido e molde, a RT obtida fica entre 33 e 33,7 MPa, sendo um resultado inferior, quando comparado às condições B, D, F e I, que obtiveram RT acima de 34,7 MPa.

Por fim, há o caso das condições G e S2. A diferença básica entre elas é referente à velocidade de injeção utilizada durante a moldagem, conforme pode ser visto na tabela 45.

Tabela 45 – Comparação entres condições G e S2.

| Condição | T <sub>F</sub> | T <sub>M</sub> | P   | V         | RT    | RI     |
|----------|----------------|----------------|-----|-----------|-------|--------|
| G        | 240            | 45             | 250 | <b>80</b> | 34,79 | 332,91 |
| S2       | 240            | 45             | 250 | <b>50</b> | 33,02 | 334,88 |

Fonte: O autor.

Essa leve redução na velocidade de injeção permitiu um pequeno aumento na RI, enquanto a RT permaneceu praticamente inalterada, fato que reforça o resultado obtido pela ANAVA, onde a velocidade de injeção tem pouco efeito nas propriedades mecânicas, quando comparada aos outros parâmetros.

### 5.13.2 Relação entre distribuição de Polibutadieno e propriedades mecânicas

A adição de Polibutadieno no ABS tem por objetivo a melhoria da Resistência ao Impacto. Portanto o ABS pode ser definido como um polímero tenacificado, pois o Polibutadieno é um elastômero.

Através do ataque químico pela solução química, as partículas de Polibutadieno puderam ser removidas do ABS. Com o auxílio do MEV e do software ImageJ, foi possível determinar o tamanho médio das partículas e sua distribuição.

Tabela 46 – Tamanho médio das partículas de PB e propriedades mecânicas médias obtidas nas diferentes condições de injeção.

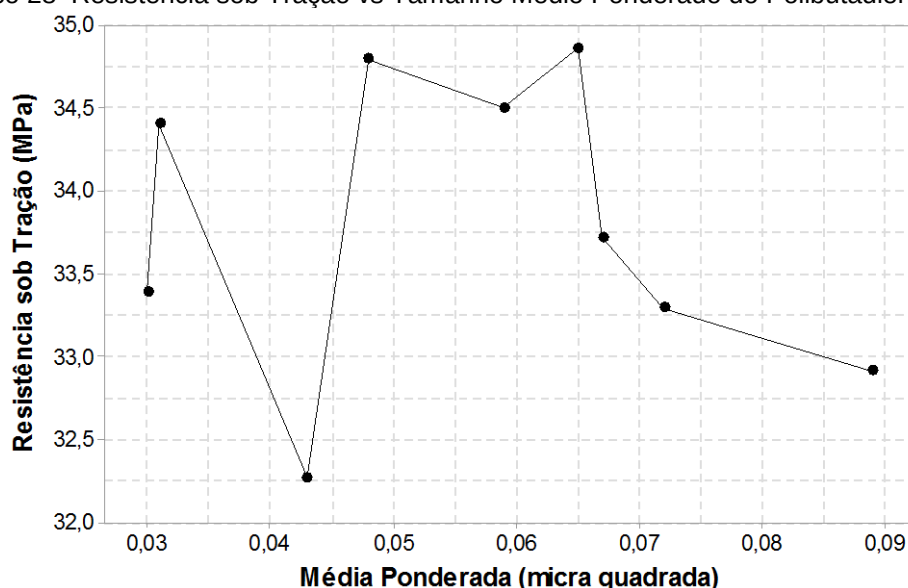
| Condição | Média ( $\mu\text{m}^2$ ) | Média ponderada ( $\mu\text{m}^2$ ) | IDB  | RT (MPa) | RI (J/m) |
|----------|---------------------------|-------------------------------------|------|----------|----------|
| A        | 0,037                     | 0,043                               | 1,18 | 32,27    | 334,46   |
| B        | 0,026                     | 0,031                               | 1,17 | 34,40    | 371,77   |
| C        | 0,059                     | 0,072                               | 1,21 | 33,29    | 360,16   |
| D        | 0,050                     | 0,059                               | 1,18 | 34,50    | 355,56   |
| E        | 0,069                     | 0,089                               | 1,28 | 32,91    | 352,25   |
| F        | 0,053                     | 0,065                               | 1,23 | 34,86    | 354,41   |
| G        | 0,055                     | 0,067                               | 1,22 | 33,72    | 295,54   |
| H        | 0,025                     | 0,030                               | 1,19 | 33,39    | 328,90   |
| I        | 0,041                     | 0,048                               | 1,18 | 34,79    | 332,32   |

Fonte: O autor.

O Índice de Dispersão de Borracha (IDB) foi determinado pela razão entre a média ponderada e a média aritmética; quanto mais próximo de 1 é o seu valor, mais monodisperso está o elastômero, isto é, não grande variação de tamanho entre as diferentes partículas.

A fim de se avaliar a influência do tamanho do PB nas propriedades mecânicas de Resistência sob Tração (RT) e ao Impacto (RI), foram traçados gráficos de RT vs tamanho médio ponderado e RI vs tamanho médio ponderado, os quais são apresentados abaixo.

Gráfico 28–Resistência sob Tração vs Tamanho Médio Ponderado do Polibutadieno (PB).

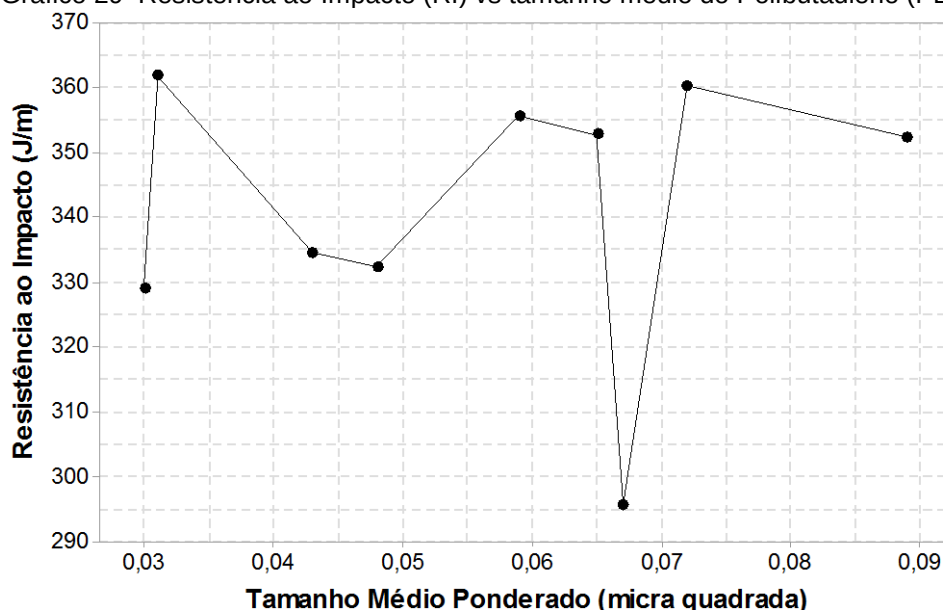


Fonte: O autor.

Como pode ser observado, há uma tendência entre a Resistência sob Tração (RT) e o tamanho médio das partículas de Polibutadieno, com exceção da condição A (3º ponto). A Resistência sob Tração aumenta conforme o tamanho médio chega à  $0,05 \mu\text{m}^2$ , em seguida se mantém constante até  $0,065$  e, quando o tamanho médio é superior a  $0,065$ , a RT torna a cair.

Quanto à Resistência ao Impacto (RI), não foi possível observar uma tendência, como pode ser visto no gráfico 29.

Gráfico 29—Resistência ao Impacto (RI) vs tamanho médio do Polibutadieno (PB).



Fonte: O autor.

### 5.13.3 Relação entre parâmetros de injeção e tamanho médio dos domínios

No intuito de se avaliar se as condições de injeção afetam o tamanho médio, foi aplicada a Análise de Variância no tamanho médio ponderado das partículas de Polibutadieno. Os resultados são mostrados na tabela abaixo.

Tabela 47 – Análise de Variância aplicada ao tamanho médio ponderado de PB.

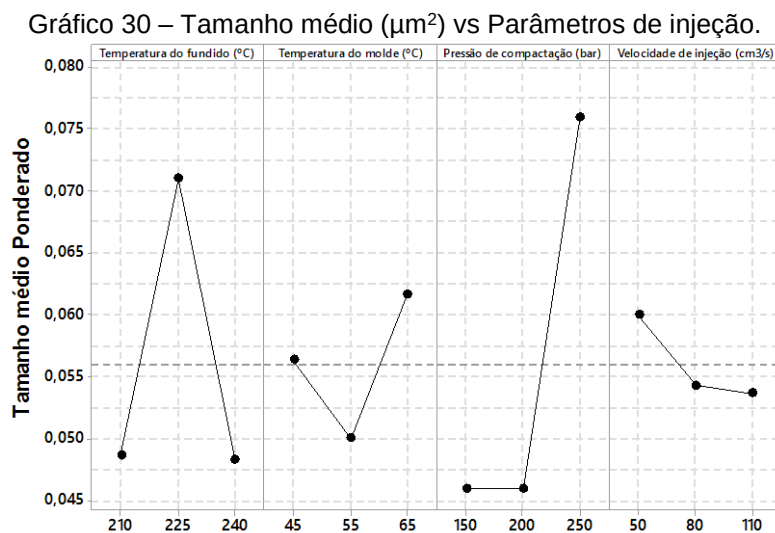
| Parâmetro              | DOF | Soma dos quadrados | Contribuição |
|------------------------|-----|--------------------|--------------|
| Temperatura do fundido | 2   | 0,001013           | 32,77%       |
| Temperatura do molde   | 2   | 0,000205           | 6,62%        |
| Pressão de compactação | 2   | 0,001800           | 58,25%       |
| Velocidade de injeção  | 2   | 0,000073           | 2,35%        |
| Erro                   | 0   |                    |              |
| Total                  | 8   | 0,003090           | 100,00%      |

Fonte: O autor.

Os fatores que apresentaram maior influência sobre o tamanho médio foi a pressão de compactação (58,25 %) e temperatura do fundido (32,77 %).

Comparativamente, a temperatura do molde e a velocidade de injeção não apresentaram influência significativa.

No gráfico 30 é demonstrada a variação do tamanho médio com os 4 parâmetros de injeção. É possível observar o porquê da pressão de compactação foi o fator mais influente no tamanho médio.



Fonte: O autor.

## 6 CONCLUSÃO

As condições da moldagem por injeção apresentam uma influência considerável nas propriedades mecânicas do polímero ABS. Os testes estatísticos revelaram que os parâmetros de injeção, tais como temperatura do fundido, temperatura do molde, pressão de compactação e velocidade de injeção apresentam perfil e o “peso” de suas respectivas influências variando conforme a propriedade a ser considerada.

A Resistência Máxima sob Tração (ou tensão de escoamento, no caso do ABS) apresentou uma grande variação conforme altera-se os parâmetros de injeção, devido a diferença significativa apresentada pelo teste de Tukey. Entre as nove condições de injeção, a condição F apresentou o maior módulo de RT (34,9 MPa), enquanto a condição A apresentou o valor mais baixo (32,3 MPa), devido ao preenchimento incompleto.

A pressão de compactação teve maior implicação na RT, conforme calculado pela ANAVA, responsável por 56,2 % da contribuição percentual na variação dessa propriedade, seguido pela temperatura do fundido, temperatura do molde e velocidade de injeção.

O Módulo Elástico, por sua vez, apresentou uma grande variação em seu valor médio (entre 735 MPa para condição C e 1 GPa para a condição I), mas o Teste de Tukey mostrou menor quantidade de diferenças significativas entre as condições. A ANAVA apontou que novamente a pressão de compactação teve maior influência no Módulo Elástico, no valor de 44,8 %, seguido pela temperatura do fundido (24,2 %), velocidade de injeção (22,7%) e temperatura do molde (8,3 %).

A Força Máxima sob Impacto é um parâmetro obtido nos ensaios de impacto instrumentado, que foi pouco sensível aos diferentes parâmetros de injeção. Seu valor médio variou entre 259,0 e 282,5 N. A força necessária para fraturar sob impacto e sob tração (diferentes modos de solicitação) é bem diferente. A temperatura do fundido apresentou influência majoritária de 78,3 %.

A Resistência ao Impacto, uma das características mais marcantes desse polímero, variou entre 295,5 J/m (condição G) e 361,8 J/m (condição B).

Novamente temperatura do fundido apresentou o maior efeito na RI (64,3 %), seguida pela temperatura do molde (21,6 %).

Também foi avaliada a influência dos parâmetros de injeção no peso das amostras (e por tabela em sua densidade). Conforme apontado pelo ANAVA, os 4 parâmetros de injeção estudados tiveram uma influência considerável. Ao se elevar os valores dos parâmetros, há uma tendência no aumento da massa (e de sua densidade), exceto no caso da velocidade de injeção entre 80 e 110 cm<sup>3</sup>/s, onde ocorreu uma leve redução.

A partir do Método Taguchi Ortogonal e da Superfície de Resposta, foram definidas algumas condições, que teve por objetivo avaliar a eficiência de ambas as técnicas de otimização em prever os valores de suas propriedades. Além disso, foi utilizado a técnica de regressão linear para prever as propriedades. O método Taguchi Ortogonal foi mais efetivo na predição das propriedades, quando comparado às outras duas técnicas.

Exceto no caso do Módulo Elástico, o qual apresentou uma certa dificuldade em prever seus valores, a diferença percentual entre os valores obtidos e previstos ficou entre 0,3 e 7,1 %, para o Método Taguchi Ortogonal, enquanto a Superfície de Resposta apresentou diferença superficial entre 1,8 e 8,1 %. A Regressão Linear conseguiu prever algumas propriedades com boa precisão, mas, em outros casos, a diferença chegou à valores acima de 50 %, não sendo confiável.

Quanto à fratura, sob tração o ABS apresentou uma fratura frágil. Entretanto, sob impacto, a fratura apresentou características dúcteis, conforme apontado pelo Índice de Fragilidade (BI) e pelas curvas de impacto instrumentado.

Outro ponto nesse trabalho foi o estudo microestrutural, onde foram avaliados os efeitos dos parâmetros de injeção na morfologia do ABS. As imagens de MEV dos corpos fraturados por impacto das 9 condições não apresentaram diferenças significativas.

Os domínios elastoméricos foram contados e medidos em relação à sua área, a fim de se determinar a distribuição de Polibutadieno na matriz do ABS. As condições H e B apresentaram os menores valores médios (em torno de

0,03  $\mu\text{m}^2$ ). A condição B também apresentou os tamanhos com menor variação de tamanho (monodispersão). O menor tamanho médio e sua melhor dispersão de tamanho contribuiu para sua Resistência ao Impacto ser a mais alta das condições.

O alívio de tensões não provocou o efeito esperado na Resistência ao Impacto. Houve uma redução nos valores da Resistência sob Tração e um aumento efetivos no Módulo Elástico. Entretanto não ocorreu a elevação da RI, devido à degradação (amarelamento) apresentada pelos corpos de provas submetidos ao alívio de tensões.

Entre as 9 condições iniciais da matriz Taguchi, a condição B apresentou a melhor Resistência ao Impacto, combinado com um valor de Resistência sob Tração apenas 0,5 MPa menor que o maior valor de RT médio obtido. Combinação semelhante de propriedades pode ser observado na condição S1.

### **SUGESTÕES DE TRABALHOS**

- 1) Analisar efeito dos parâmetros de injeção via Método Taguchi Ortogonal em polímeros semicristalinos;
- 2) Comparar diferentes métodos de otimização e predição de propriedades;
- 3) Estudar o efeito de diferentes tempos e temperaturas de alívio de tensões

## REFERÊNCIAS

- [1] XU, Yingjie et al. Optimization of injection molding process parameters to improve the mechanical performance of polymer product against impact. The International **Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 76, n. 9-12, p.2199-2208, 10 out. 2014
- [2] COURBEBAISSE, Guy; GARCIA, David. Shape analysis and injection molding optimization. **Computational Materials Science**, [s.l.], v. 25, n. 4, p.547-553, dez. 2002.
- [3] CHARRIER, J. M.. **Polymeric materials and processing: Plastics, elastomers and composites**. Munich: C. Hanser Publishers, 1990. 655 p.
- [4] ROSATO D.V. **Injection Molding Handbook**, 3 ed. KluwerAcademic, Massachussets, 2000.
- [5] ZEMA, Lucia et al. Injection Molding and its application to drug delivery. **Journal Of Controlled Release**, [s.l.], v. 159, n. 3, p.324-331, maio 2012.
- [6] OSSWALD, T.A. TURNG, L.-S., GRAMANN, P.J. (Eds.), **Injection molding Handbook**, 2 ed, Hanser, Ohio, 2008,p. 19–61.
- [7] BRETAS, Rosário E. S.; D'ÁVILA, Marcos A.. **Reologia dos polímeros fundidos**. 2. ed. São Carlos: Edufscar, 2005. 257 p.
- [8] BRYCE D. M, Plastic injection molding... manufacturing process fundamentals, vol. 1, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 1996.
- [9] KAMAL, M. R., ISAYEV, A.I., LIU, S-J. (Eds.), **Injection Molding: Technology and Fundamentals**, Hanser, Ohio, 2009.
- [10] MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**.São Paulo: Artliber, 2005. 431 p.
- [11] LOTTI, Cybele. **Influência das condições de processamento na morfologia e nas propriedades mecânicas de sistemas poliméricos moldados por injeção e sua predição através de redes neurais**

**artificiais**. 2004. 228 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

[12] STRONG, A. Brent. **Plastics: Materials and Processing**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 811 p.

[13] CHIU, Cheng-ping; SHIH, Laming-chang; WEI, Jong-hwei. Dynamic modeling of the mold filling process in an injection molding machine. **Polymer Engineering And Science**, [s.l.], v. 31, n. 19, p.1417-1425, out. 1991. Wiley-Blackwell.

[14] AGRAWAL, A. R.; PANDELIDIS, I. O.; PECHT, M.. Injection-molding process control: A review. **Polymer Engineering And Science**, [s.l.], v. 27, n. 18, p.1345-1357, out. 1987. Wiley-Blackwell.

[15] COX, Howard W.; MENTZER, Charles C.. Injection molding: The effect of fill time on properties. **Polymer Engineering And Science**, [s.l.], v. 26, n. 7, p.488-498, abr. 1986. Wiley-Blackwell.

[16] TROTIGNON, Jean-pierre; VERDU, Jacques. Skin-core structure–fatigue behavior relationships for injection-molded parts of polypropylene. II. Morphology–fatigue behavior relationships. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.19-36, jul. 1987. Wiley-Blackwell.

[17] BRYDSON, J. A. **Flow properties of polymer melts**. Califórnia: van Nostrand Reinhold Co., 1970. 199 p.

[18] CANEVAROLO Jr, S.V. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 3. ed. rev. ampl. São Paulo: Artliber Editora, 2013, 280 p.

[19] TADMOR, Z..Molecular orientation in injection molding. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 18, n. 6, p.1753-1772, jun. 1974. Wiley-Blackwell.

[20] TADMOR, Zehev; GOGOS, Costas G.. **Principles of Polymer Processing**. 2. ed. S.l: Wiley-interscience, 2006. 961 p.

[21] ROSATO, D.V.. **Plastics Processing Data Handbook**. 2. ed. S.l: Springer Us, 1997. 670 p

- [22] ROSATO, D. V. Injection Molding Basics and Overviews. **SPE-IMD Newsletter**, v. 48,1998.
- [23] PANTANI, R. et al. Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers. **Progress In Polymer Science**, [s.l.], v. 30, n. 12, p.1185-1222, dez. 2005. Elsevier BV.
- [24] SONG, M.c. et al. Research on effects of injection process parameters on the molding process for ultra-thin wall plastic parts. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 187-188, p.668-671, jun. 2007. Elsevier BV.
- [25] KANTZ, M. R.; NEWMAN, H. D.; STIGALE, F. H.. The skin-core morphology and structure–property relationships in injection-molded polypropylene. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 16, n. 5, p.1249-1260, maio 1972. Wiley-Blackwell.
- [26] MENGES, G.; WUBKEN, G.; HORN, B.. Effect of the processing conditions on the crystallinity and morphological structure of partially crystalline injection moldings. **Colloid Polym Sci.**, S.l., v. 254, n. 3, p.267-278, 1976.
- [27] FUJIYAMA, Mitsuyoshi; WAKINO, Tetsuo; KAWASAKI, Youtoku. Structure of skin layer in injection-molded polypropylene. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.29-49, jan. 1988. Wiley-Blackwell.
- [28] WENIG, W.; HERZOG, F. Injection molding of polypropylene: X-ray investigation of the skin–core morphology. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 50, n. 12, p.2163-2171, 20 dez. 1993. Wiley-Blackwell.
- [29] AKBARZADEH A.; SADEGHI, M. Parameter study in plastic injection molding process using statistical methods and IWO algorithm. **Int J Model Optim**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.141–145, jun. 2001
- [30] HU, Juan et al. The effect of multiple variables on tensile property of injection-molded polypropylene through the combination of orthogonal design and variance analysis. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 127, n. 2, p.1198-1202, 16 maio 2012. Wiley-Blackwell.
- [31] OZCELIK, Babur; OZBAY, Alper; DEMIRBAS, Erhan. Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic

injection molding. **International Communications In Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 37, n. 9, p.1359-1365, nov. 2010. Elsevier BV.

[32] ZHOU, Yuanxin; MALLICK, P.k.. Effects of melt temperature and hold pressure on the tensile and fatigue properties of an injection molded talc-filled polypropylene. **Polymer Engineering & Science**, [s.l.], v. 45, n. 6, p.755-763, 2005. Wiley-Blackwell.

[33] DAR, Uzair Ahmed et al. The effect of injection molding process parameters on mechanical and fracture behavior of polycarbonate polymer. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 134, n. 7, p.327-345, 30 set. 2016. Wiley-Blackwell.

[34] KURT, Mustafa et al. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. **Materials & Design**, [s.l.], v. 30, n. 8, p.3217-3224, set. 2009. Elsevier BV.

[35] RUSDI, M. S. et al. Numerical Investigation on the Effect of Pressure and Temperature on the Melt Filling During Injection Molding Process. **Arabian Journal For Science And Engineering**, [s.l.], v. 41, n. 5, p.1907-1919, 3 fev. 2016. Springer Nature.

[36] MOON, Jong-sin et al. Effect of process conditions on the dart impact properties of thin-wall injection-molded polycarbonate plates. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 127, n. 3, p.1466-1474, 7 maio 2012. Wiley-Blackwell.

[37] WANG, Quan et al. Effect of process parameters on cavity pressure in injection molding. **American Institute Of Physics**, [s.l.], 2017.

[38] KASHYAP, Satadru; DATTA, Dilip. Process parameter optimization of plastic injection molding: a review. **International Journal Of Plastics Technology**, S.l, v. 1, n. 19, p.1-18, 2015.

[39] Manual de injeção INOVA.

[40] LEYVA-PORRAS, César et al. Effect of Molding Parameters on Young's Modulus of an Injection Molded Low-Density Polyethylene (LDPE). **Industrial**

**&Engineering Chemistry Research**, [s.l.], v. 52, n. 16, p.5666-5671, 15 abr. 2013. American Chemical Society (ACS).

[41] LI, Xi-ping; ZHAO, Guo-qun; YANG, Can. Effect of mold temperature on motion behavior of short glass fibers in injection molding process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 73, n. 5-8, p.639-645, 2 maio 2014. Springer Nature.

[42] Chen CS, Chen TJ, Chien RD, Chen SC (2007) Investigation on the weldline strength of thin-wall injection molded ABS parts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**34:448– 455.

[43]DAMIANI, Renato Adriano. **Estudo do efeito de parâmetros de processamento por injeção nas propriedades mecânicas do nanocompósito de Poliamida/Fibra de vidro/Montmorilonita**. 2013. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

[44] Chen, S.C., et al., Effect of cavity surface coating on mold temperature variation and the quality of injection molded parts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 36: p. 1030-1035. 2009

[45]. Chen, S.C., W.R. Jong, and J.A. Chang, Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line. **Journal of Applied Polymer Science**, 101: p. 1174-1180. 2006

[46] Zhao, G., et al., Research and application of a new rapid heat cycle molding with electric heating and coolant cooling to improve the surface quality of large LCD TV panels. **Polymers for Advanced Technologies**, 22: p. 476-487. 2011

[47] Pantani, R., et al., Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers. **Progress in Polymer Science**, 30: p. 1185-1222. 2005

[48] CHEN, Xi; GAO, Furong. A study of packing profile on injection molded part quality. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 358, n. 1-2, p.205-213, out. 2003. Elsevier BV.

- [49] JANSEN, K.m.b.; VAN DIJK, D.j.; KEIZER, K.p.. Warpage of Injection Moulded Plates and Corner Products. **International Polymer Processing**, [s.l.], v. 13, n. 4, p.417-424, dez. 1998. Carl HanserVerlag.
- [50] LIPAROTI, Sara; SORRENTINO, Andrea; TITOMANLIO, Giuseppe. Rapid control of mold temperature during injection molding process: Effect of packing pressure. **Aip Conference Proceedings**, [s.l.], v. 1695, p.1-2, 2015. AIP Publishing LLC.
- [51] SHOKRI, Parvin; BHATNAGAR, Naresh. Effect of packing pressure on fiber orientation in injection molding of fiber-reinforced thermoplastics. **Polymer Composites**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.214-223, 2007. Wiley-Blackwell.
- [52] OZCELIK, Babur; KURAM, Emel; TOPAL, M. Mustafa. Investigation the effects of obstacle geometries and injection molding parameters on weld line strength using experimental and finite element methods in plastic injection molding. **International Communications In Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 39, n. 2, p.275-281, fev. 2012. Elsevier BV.
- [53] KAGITCI, Yusuf Caglar; TARAKCIOGLU, Necmettin. The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 85, n. 5-8, p.1125-1135, 3 nov. 2015. Springer Nature.
- [54] HASSAN, Hamdy. An experimental work on the effect of injection molding parameters on the cavity pressure and product weight. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 67, n. 1-4, p.675-686, 10 out. 2012. Springer Nature
- [55] Huang MC, Tai CC. The effective factors in the warpage problem of an injectionmolded part with a thin shell feature. **J Mater Process Technol**, 2001;110:1–9
- [56] VARELA, A.e. Self-Tuning Pressure Control in an Injection Moulding Cavity During Filling. **Chemical Engineering Research And Design**, [s.l.], v. 78, n. 1, p.79-86, jan. 2000.

- [57] HUANG, Ming-shyan. Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 183, n. 2-3, p.419-424, mar. 2007
- [58] HUANG, Xiahong; ZHOU, Chixing. Postfilling analysis of viscoelastic polymers with internal structure parameter. **Polym. Eng. Sci.**, [s.l.], v. 39, n. 11, p.2313-2323, nov. 1999.
- [59] JIANG, Kun et al. High speed injection molding of high density polyethylene — Effects of injection speed on structure and properties. **Chinese Journal Of Polymer Science**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.456-464, 9 abr. 2011. Springer Nature
- [60] RAOS, Pero; STOJSICJosip. Influence of Injection Moulding Parameters on Tensile Strength of Injection Moulded Part. **Manufacturing and Industrial Engineering**, [s.l.], v.13, n. 3-4, p. 1-3, 10 nov. 2014. Technical University of Kosice.
- [61] FERNANDES, Anderson de C. et al. Influência da "velocidade de injeção" e "tempo de recalque" nas características de peças injetadas em Polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais**. Caxias do Sul: Cobef, 2011. p. 1 - 8.
- [62] PORCEL, Fernanda da Silva. **Influence of processing parameters and composition on the morphology of ABS resins**. 2004. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- [63] CHIEN, Rean Der et al. Investigations on the Weldline Tensile Strength of Thin-wall Injection Molded Parts. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s.l.], v. 23, n. 6, p.575-588, 1 abr. 2004. SAGE Publications.
- [64] NARH, Kwabena A.; LI, Zhigang. Morphological development during injection molding of self-reinforcing composites. I: Experimental results. **Polymer Composites**, [s.l.], v. 21, n. 5, p.751-761, out. 2000. Wiley-Blackwell.
- [65] LOTTI, Raquel S. Aplicabilidade Científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 35-43, abr. 2006.

- [66] ZHOU, J.; TURNG, L.-s.; KRAMSCHUSTER, A.. Single and Multi Objective Optimization for Injection Molding Using Numerical Simulation with Surrogate Models and Genetic Algorithms. **International Polymer Processing**, [s.l.], v. 21, n. 5, p.509-520, nov. 2006.
- [67] SHEN, Changyu; WANG, Lixia; LI, Qian. Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 183, n. 2-3, p.412-418, mar. 2007.
- [68] KURTARAN, Hasan; OZCELIK, Babur; ERZURUMLU, Tuncay. Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 169, n. 2, p.314-319, nov. 2005.
- [69] KURTARAN, Hasan; ERZURUMLU, Tuncay. Efficient warpage optimization of thin shell plastic parts using response surface methodology and genetic algorithm. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 27, n. 5-6, p.468-472, 27 abr. 2005.
- [70] YIN, Fei et al. Back Propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding. **Materials & Design**, [s.l.], v. 32, n. 4, p.1844-1850, abr. 2011.
- [71] TAGUCHI, G. KONISHI, S. Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality. American supplier institute. American Supplier Institute; 1987. p. 8–35.
- [72] TAGUCHI, G.. **Introduction to quality engineering**. 6. ed. New York: Asian Productivity Organization, 1988. 191 p.
- [73] SIMPSON, T.W. IE 466: Concurrent Engineering.
- [74] FEIGENBAUM, A. V.. **Total quality control, 3rd edn. McGraw Hill Inc.,** 3. ed. New York: Mcgraw-hill Book Company, Inc, 1991. 896 p.
- [75] HAFEZI, M. et al. Comparison of Physicomechanical Properties of NBR—PVC Blend Cured by Sulfur and Electron Beam. **Journal Of Elastomers & Plastics**, [s.l.], v. 39, n. 2, p.151-163, abr. 2007. SAGE Publications.

[76] ANTONY, J.; KAYE, M.. **Experimental quality- a strategic approve to achieve and improve quality.** Kluwer Academic Publishers,. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 205 p.

[77] Ross, P.J. **Taguchi Techniques for Quality Engineering** Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design. 2nd Edition, *McGraw-Hill, New York*, 1996.

[78] PACKIANATHER, M. S.; DRAKE, P. R.; ROWLANDS, H.. Optimizing the parameters of multilayered feedforward neural networks through Taguchi design of experiments. **Quality And Reliability Engineering International**, [s.l.], v. 16, n. 6, p.461-473, nov. 2000. Wiley-Blackwell.

[79] ANTONY, Jiju et al. An application of Taguchi method of experimental design for new product design and development process. **Assembly Automation**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.18-24, jan. 2006.

[80] DE MELO E CASTRO, Paula M. Taguchi's method: Quality Control with a non-conventional use of design of experiments (DOE).

[81] TAGUCHI, G.. **Introduction to quality engineering.** New York: Mcgraw-hill, 1990.

[82]PEACE, G. S.. **Taguchi methods: a hands-on approach.** Reading, Ma: Addison-wesley, 1993.

[83] KIM, Young Jin; CHO, Byung Rae. Economic considerations on parameter design. **Quality And Reliability Engineering International**, S.l., v. 6, n. 16, p.501-514, nov. 2000.

[84] ANTONY, J.. Simultaneous Optimization of Multiple Quality Characteristics in Manufacturing Processes Using Taguchi's Quality Loss Function. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 17, n. 2, p.134-138, 1 jan. 2001. Springer Nature.

[85] WU, Y.; WU, A.. **Taguchi methods for robust design.** New York: American Society Of Mechanical Engineers, 2000.

[86] YANG, W.h.; TARNG, Y.s.. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. **Journal Of Materials**

**Processing Technology**, [s.l.], v. 84, n. 1-3, p.122-129, dez. 1998. Elsevier BV.

[87] GHANI, J.a; CHOUDHURY, I.a; HASSAN, H.h. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 145, n. 1, p.84-92, jan. 2004. Elsevier BV.

[88] MONTGOMERY, D. C.. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. S.l: John Wiley & Sons, Inc, 2001.

[89] Foster WT (2000) Basic Taguchi design of experiments. In: National Association of Industrial Technology Conference, Pittsburgh, PA

[90] YANG, Yung-kuang et al. A Study of Taguchi and Design of Experiments Method in Injection Molding Process for Polypropylene Components. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 27, n. 8, p.819-834, 31 jan. 2008. SAGE Publications.

[91] TAGUCHI, G.. **Introduction to quality engineering**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.

[92] PHADKE, M. S.. **Quality engineering using robust design**. Englewood Cliffs, Nj: Prentice-hall, 1989.

[93] ROY, R. K.. **A primer on the Taguchi method**. New York: van Nostrand Reinhold, 1990.

[94] YANG, Yi; GAO, Furong. Injection molding product weight: Online prediction and control based on a nonlinear principal component regression model. **Polymer Engineering & Science**, [s.l.], v. 46, n. 4, p.540-548, 2006. Wiley-Blackwell.

[95] BUDINSKI, K. G.. **Engineering materials: properties and selection**,. 5. ed. New Jersey: Prentice-hall, 1996.

[96] MURTHY, N. Sanjeeva; KAGAN, Val A.; BRAY, Robert G.. Optimizing the Mechanical Performance in Semi-Crystalline Polymers: Roles of Melt Temperature and Skin-Core Crystalline Morphology of Nylon. **Journal Of**

**Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 22, n. 8, p.685-694, jun. 2003. SAGE Publications.

[97] LI, C.g.; LI, C.l.. Plastic injection mould cooling system design by the configuration space method. **Computer-aided Design**, [s.l.], v. 40, n. 3, p.334-349, mar. 2008. Elsevier BV.

[98] CHIEN, Rean Der et al. Study on the Molding Characteristics and Mechanical Properties of Injection-molded Foaming Polypropylene Parts. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 23, n. 4, p.429-444, mar. 2004. SAGE Publications.

[99] MAIL, H.; SURYADIANSYAH. A Comparative Study of the Effect of Degradation on the Properties of PP/NR and PP/RR Blends. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 43, n. 2, p.319-340, 4 jan. 2004. Informa UK Limited.

[100] LIN, Yu-hsin et al. Optimization of Injection Molding Process for Tensile and Wear Properties of Polypropylene Components via Taguchi and Design of Experiments Method. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 47, n. 1, p.96-105, 26 dez. 2007. Informa UK Limited.

[101] CHEN, Wen-chin et al. A neural network-based approach for dynamic quality prediction in a plastic injection molding process. **Expert Systems With Applications**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.843-849, out. 2008. Elsevier BV.

[102] HUANG, Ming-chih; TAI, Ching-chih. The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 110, n. 1, p.1-9, mar. 2001. Elsevier BV.

[103] LIU, Shih-jung; CHANG, Chih-yuan. The Influence of Processing Parameters on Thin-Wall Gas Assisted Injection Molding of Thermoplastic Materials. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 22, n. 8, p.711-731, jun. 2003. SAGE Publications.

[104] OZCELIK, B.; ERZURUMLU, T.. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic

algorithm. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 171, n. 3, p.437-445, fev. 2006. Elsevier BV.

[105] Ozcelik B, Sonat I (2009) Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. *Mat Desig* 30:367–375

[106] TANG, S.h. et al. The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 182, n. 1-3, p.418-426, fev. 2007. Elsevier BV.

[107] CHEN, Ching-piao et al. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. **Expert Systems With Applications**, [s.l.], v. 36, n. 7, p.10752-10759, set. 2009. Elsevier BV.

[108] SONG, M.c. et al. Research on effects of injection process parameters on the molding process for ultra-thin wall plastic parts. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 187-188, p.668-671, jun. 2007. Elsevier BV.

[109] CHEN, Chun-sheng et al. Optimum Design of Gas-assisted Injection Molding. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 24, n. 15, p.1577-1586, 17 jun. 2005. SAGE Publications.

[110] LIU, Shih-jung; YANG, Chang-yao. Application of Statistic Estimation to Weldline Strength of Injectionmolded Thermoplastic Composites. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 23, n. 13, p.1383-1396, 27 ago. 2004.

[111] LEE, B. H.; KIM, B. H.. Variation of Part Wall Thicknesses to Reduce Warpage of Injection-Molded Part: Robust Design Against Process Variability. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 36, n. 5, p.791-807, set. 1997. Informa UK Limited.

[112] LIU, Shih-jung; CHEN, Chi-feng. Significance of Processing Parameters on the Warpage of Rotationally Molded Parts. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 21, n. 8, p.723-733, maio 2002. SAGE Publications.

[113] OKTEM, Hasan; ERZURUMLU, Tuncay; UZMAN, Ibrahim. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process

parameters for a thin-shell part. **Materials & Design**, [s.l.], v. 28, n. 4, p.1271-1278, jan. 2007. Elsevier BV.

[114] LEE, B. H.; KIM, B. H.. Optimization of Part Wall Thicknesses to Reduce Warpage of Injection-Molded Parts Based on The Modified Complex Method. *Polymer-plastics Technology And Engineering*, [s.l.], v. 34, n. 5, p.793-811, set. 1995

[115] TENG, Shiang-yu; HWANG, Sheng-jye. Predicting the process induced warpage of electronic packages using the P–V–T–C equation and the Taguchi method. **Microelectronics Reliability**, [s.l.], v. 47, n. 12, p.2231-2241, dez. 2007. Elsevier BV.

[116] ERZURUMLU, T.; OZCELIK, B.. Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method. *Mat Desig* 27(10):853–861. **Mat Design**, S.l., v. 27, n. 10, p.853-861, 2006.

[117] CHANG, Tao C.; FAISON, Ernest. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the taguchi method. **Polymer Engineering & Science**, [s.l.], v. 41, n. 5, p.703-710, maio 2001. Wiley-Blackwell.

[118] ALTAN, M. Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANAVA and Neural Network methods. **Mat Design**, S.l., v. 31, n. 1, p.599-604, 2010.

[119] WU, Cheng-hsien; SU, Yi-li. Optimization of wedge-shape parts for injection molding and injection compression molding. **International Communications In Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.215-224, mar. 2003. Elsevier BV.

[120] KUO, Chung-feng Jeffrey; SU, Te-li; LI, Yung-chang. Construction and Analysis in Combining the Taguchi Method and the Back Propagation Neural Network in the PEEK Injection Molding Process. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 46, n. 9, p.841-848, 3 set. 2007. Informa UK Limited.

[121] CHEN, R. S; LEE, H. H.; YU, C. Y.. Application of Taguchi's method on the optimal process design of an injection molded PC/PBT automobile bumper. **Comp Struc**, S.l., v. 39, n. 3-4, p.209-214, nov. 1997.

- [122] SHEN, Changyu et al. Investigation of the Effect of Molding Variables on Sink Marks of Plastic Injection Molded Parts Using Taguchi DOE Technique. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 46, n. 3, p.219-225, 8 mar. 2007. Informa UK Limited.
- [123] WANG, Lixia et al. Effects of Process Parameters and Two-Way Interactions on Sink Mark Depth of Injection Molded Parts by Using the Design of Experiment Method. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 47, n. 1, p.30-35, 26 dez. 2007.
- [124] LIU, Shih-jung; LAI, Cheng-chih; LIN, Shun-tien. Optimizing the impact strength of rotationally molded parts. **Polymer Engineering & Science**, [s.l.], v. 40, n. 2, p.473-480, fev. 2000. Wiley-Blackwell.
- [125] KUO, H. C.; JENG., M. C.. Effects of part geometry and injection molding conditions on the tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene polymer. **Mat AndDesig**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.884-893, dez. 2012.
- [126] UNG, Chin-ping; TIEN, Yung-feng. Study of Multiresponse Optimization for Fiber-reinforced Poly(Butylene Terephthalate). **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 24, n. 9, p.923-933, jun. 2005. SAGE Publications.
- [127] ALTAN, Mirigul; YURCI, Mehmet Emin. Optimization of Residual Stresses in the Surface Regions of Injection Moldings. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 49, n. 1, p.32-37, 31 dez. 2009. Informa UK Limited.
- [128] SURESHKUMAR, M. S. et al. Optimization of Process Parameters of Immiscible Blends of Linear Low-Density Polyethylene and Poly Dimethyl Siloxane Rubber Using Taguchi Methodology. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 47, n. 4, p.341-345, 31 mar. 2008. Informa UK Limited.
- [129] YANG, Yung-kuang. Optimization of Injection-Molding Process for Mechanical and Tribological Properties of Short Glass Fiber and Polytetrafluoroethylene Reinforced Polycarbonate Composites with Grey Relational Analysis: A Case Study. **Polymer-plastics Technology And Engineering**, [s.l.], v. 45, n. 7, p.769-777, jun. 2006. Informa UK Limited.

- [130] TANYILDIZI, H.. Statistical analysis for mechanical properties of polypropylene fiber reinforced lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature. **Mat AndDesig**, S.I., v. 30, p.3252-3258, 2009.
- [131] FUNG, Chin-ping; HUANG, Cheng-hung; DOONG, Ji-liang. The Study on the Optimization of Injection Molding Process Parameters with Gray Relational Analysis. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 22, n. 1, p.51-66, jan. 2003. SAGE Publications.
- [132] PANTANI, R. et al. Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers. **Progress In Polymer Science**, [s.l.], v. 30, n. 12, p.1185-1222, dez. 2005. Elsevier BV.
- [133] KANTZ, M. R.; NEWMAN, H. D.; STIGALE, F. H.. The skin-core morphology and structure–property relationships in injection-molded polypropylene. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 16, n. 5, p.1249-1260, maio 1972. Wiley-Blackwell.
- [134] MENGES, G.; WUBKEN, G.; HORN, B.. Effect of the processing conditions on the crystallinity and morphological structure of partially crystalline injection moldings. **Colloid Polym Sci.**, [s.l.], v. 254, n. 3, p.267-278, 1976.
- [135] FUJIYAMA, Mitsuyoshi; WAKINO, Tetsuo; KAWASAKI, Youtoku. Structure of skin layer in injection-molded polypropylene. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.29-49, jan. 1988. Wiley-Blackwell.
- [136] WENIG, W.; HERZOG, F.. Injection molding of polypropylene: X-ray investigation of the skin–core morphology. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 50, n. 12, p.2163-2171, 20 dez. 1993. Wiley-Blackwell.
- [137] GIACONI, G.f. et al. Development of toughness in ABS resins. **Polymer**, [s.l.], v. 39, n. 25, p.6315-6324, dez. 1998. Elsevier BV.
- [138] YAMAKAWA, R. S. **Estudos de tenacificação de termo polímeros ABS através de misturas com SAN**. São Carlos, 2000 155p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Materiais) UFSCar.
- [139] ARAUJO E M **Tenacificação da poliamida 6 com ABS por meio da técnica de compatibilização in situ com o uso de copolímeros acrílicos**

**reativos**, São Carlos, 2001. 207p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) UFSCar.

[140] MANTOVANI, G. L. **Compatibilização por extrusão reativa de blendas poliméricas PBT/ABS e estudo da estabilidade da morfologia de fases**, 2002, 243 p. Tese (doutorado) UFSCar.

[141] KIM, B. K.; SHIN, G. S.. Melt blends of SAN with SAN-graft-polybutadiene (PB). **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 48, n. 6, p.945-951, 10 maio 1993. Wiley-Blackwell.

[142] BRYDSON, J. A.. **Plastics materials**. 7. ed. Oxford: Butterworth-heinemann, 1999.

[143] PÉREZ, J. M. et al. Effect of Reprocessing and Accelerated Weathering on ABS Properties. *Journal Of Polymers And The Environment*, [s.l.], v. 18, n. 1, p.71-78, 22 dez. 2009.

[144] LIU, X. **Mechanical recycling of engineering thermoplastics using alloying techniques**. Gothenburg: Chalmers University Of Technology, 1976.

[145] ARNOLD, J.c. et al. The use of FTIR mapping to assess phase distribution in mixed and recycled WEEE plastics. **Polymer Testing**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.459-470, jun. 2010. Elsevier BV.

[146] SCHLUMMER, Martin et al. Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. **Chemosphere**, [s.l.], v. 67, n. 9, p.1866-1876, abr. 2007. Elsevier BV.

[147] HEO, Cheol et al. ABS nanocomposite films based on functionalized-graphene sheets. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 124, n. 6, p.4663-4670, 15 jun. 2012. Wiley-Blackwell.

[148] HATUI, Goutam et al. Modification of MWCNT and its effect on ABS/LCP blend system. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 129, n. 1, p.57-64, 3 nov. 2012. Wiley-Blackwell.

- [149] JO, Mi; Yeong et al. Effects of compatibilizers on the mechanical properties of ABS/PLA composites. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 125, n. 2, p.231-238, 27 mar. 2012. Wiley-Blackwell.
- [150] HASHEMI, S.; LEPESSOVA, Y.. Temperature and weldline effects on tensile properties of injection moulded short glass fibre PC/ABS polymer composite. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 42, n. 8, p.2652-2661, 4 jan. 2007. Springer Nature.
- [151] ASTM D3641-15, Standard Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastic Molding and Extrusion Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [152] Boletim técnico Brasquem, n. 5. mai 2002.
- [153] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [154] ASTM D256-10e1, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [155] AKAY, M.; OZDEN, S.. An Assessment of Thermal Stresses in Injection Moulded ABS Copolymer. **International Polymer Processing**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.179-187, maio 1996. Carl Hanser Verlag.
- [156] ZHANG, Bin et al. Annealing-induced periodic patterns in solution grown polymer single crystals. **Rsc Advances**, [s.l.], v. 5, n. 17, p.12974-12980, 2015. Royal Society of Chemistry (RSC).
- [157] KIM, B. K.; YOON, L. K.; XIE, X.-m.. Effects of annealing in ABS ternary blends. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 66, n. 8, p.1531-1542, 21 nov. 1997. Wiley-Blackwell.
- [158] Annealing of ABS. Plastic international. Disponivel em: <https://www.plasticsintl.com/documents/ABS%20Annealing.pdf>. Acessado em: 01/03/2018.

[159] Datasheet Terluran HI 10. Disponível em: <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Terluran/Styrolution+Group+GmbH/Terluran%C2%AE+HI-10/92b8be72/367>. Acessado em 22/10/2017.

[160] CORREA, C. A.; YAMAKAWA, R. S.; HAGE Jr, E. Determinação de Temperatura de Transição Dúctil-frágil de Plásticos Através de Testes de Impacto Instrumentado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [s.l.] jan. 99

[161] BUCKNALL, C. B. **Rubber Toughened Plastics**. London: Applied Science, 1977.

[162] MCCRUM, N. G.; BUCKLEY, C.p.; BUCKNALL, C.b.. **Principles of Polymer Engineering**. Oxford: Science Publications, 1988.

[163] WARD., I. M. **Mechanical Properties of Solid Polymers**. 2. ed. [s.l.]: John Wiley And Sons, 1990.

[164] DRUMOND, Fatima Brant. **Analise de variancia**: comparação de várias situações. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996. 302 p.

[165] TAKAYAMA, Tetsuo; TODO, Mitsugu; TSUJI, Hideto. Effect of annealing on the mechanical properties of PLA/PCL and PLA/PCL/LTI polymer blends. **Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials**, [s.l.], v. 4, n. 3, p.255-260, abr. 2011.

[166] BAI, Hongwei et al. Effect of annealing on the microstructure and mechanical properties of polypropylene with oriented shish-kebab structure. **Polymer International**, [s.l.], v. 61, n. 2, p.252-258, 14 out. 2011.

## ANEXOS

ANEXO I – Parâmetros de injeção nas diferentes condições e seus respectivos valores

| Condição  | Temperatura do fundido (°C) | Temperatura do molde (°C) | Pressão de compactação (bar) | Velocidade de injeção (cm³/s) |
|-----------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| <b>A</b>  | 210                         | 45                        | 150                          | 50                            |
| <b>B</b>  | 210                         | 55                        | 200                          | 80                            |
| <b>C</b>  | 210                         | 65                        | 250                          | 110                           |
| <b>D</b>  | 225                         | 45                        | 200                          | 110                           |
| <b>E</b>  | 225                         | 55                        | 250                          | 50                            |
| <b>F</b>  | 225                         | 65                        | 150                          | 80                            |
| <b>G</b>  | 240                         | 45                        | 250                          | 80                            |
| <b>H</b>  | 240                         | 55                        | 150                          | 110                           |
| <b>I</b>  | 240                         | 65                        | 200                          | 50                            |
| <b>T1</b> | 225                         | 65                        | 200                          | 80                            |
| <b>T2</b> | 240                         | 45                        | 200                          | 50                            |
| <b>S1</b> | 210                         | 65                        | 160                          | 90                            |
| <b>S2</b> | 240                         | 45                        | 250                          | 50                            |