



**Universidade Federal do Amazonas  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia de Materiais**



**ESTUDO DA TEMPERATURA FINAL, PRESSÃO FINAL E DO PONTO DE  
INJEÇÃO A PARTIR DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E METODOLOGIA  
DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

**JOELINE DUTRA DA SILVA**

**Orientador: Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça**

**Manaus/AM  
2023**

**JOELINE DUTRA DA SILVA**

**ESTUDO DA TEMPERATURA FINAL, PRESSÃO FINAL E DO PONTO DE  
INJEÇÃO A PARTIR DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E METODOLOGIA  
DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação  
em Engenharia de Materiais da  
Universidade Federal do Amazonas  
como requisito parcial para a obtenção  
do Grau de Bacharel em Engenharia de  
Materiais

**Orientador: Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça**

**Manaus/AM  
2023**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586e	Silva, Joeline Dutra Estudo da temperatura final, pressão final e do ponto de injeção a partir de simulação computacional e metodologia de superfície de resposta / Joeline Dutra Silva . 2023 89 f.: il. color; 31 cm.
	Orientador: Rannier Marques Mendonça TCC de Graduação (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.
	1. Injeção plástica. 2. Simulação computacional. 3. Ponto de injeção. 4. Superfície de Resposta. 5. Solidworks Plastics. I. Mendonça, Rannier Marques. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

**JOELINE DUTRA DA SILVA**

**ESTUDO DA TEMPERATURA FINAL, PRESSÃO FINAL E DO PONTO DE INJEÇÃO A PARTIR DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Rannier Marques Mendonça**

---

**Prof. Dr. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto**

---

**Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves**

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>9</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>13</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
3.1. Objetivo Geral.....	14
3.2. Objetivos Específicos.....	14
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
4.1. Polímeros.....	15
4.2. Polietileno.....	17
4.3. Polipropileno.....	18
4.4. Injeção Plástica.....	19
4.5. Molde de Injeção Plástica.....	20
4.6. Ponto de Injeção Plástica.....	20
4.7. Simulação Computacional.....	21
4.8. Solidworks Plastics.....	22
4.9. Geração de Malhas e Elementos Finitos.....	24
4.10. Planejamento Experimental.....	24
4.11. Superfície de Resposta.....	25
4.12. CCD – Planejamento Composto Central.....	26
4.13. Análise de Regressão.....	27
4.14. Equação de Regressão.....	27
4.15. Respostas importantes para análise.....	28
4.16. Otimização de Resposta (Determinação de condições ótimas).....	29
4.17. O método da Desejabilidade.....	30
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
5.1. Dimensões e Geometria de Estudo.....	31
5.2. Máquina Virtual Injetora.....	31
5.3. Malha Sólida.....	32
5.4. Polímeros e Parâmetros de Injeção.....	33
5.5. Definição dos Níveis das Variáveis Independentes.....	36
5.6. Planejamento Composto Central.....	37
5.7. Características do Planejamento.....	38
5.8. Valores para Simulações.....	39
5.9. Análise Estatística.....	40
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
6.1. Polipropileno.....	42
6.1.1. Análise de Regressão da Superfície de Resposta.....	43
6.1.2. Otimização da Resposta.....	52
6.1.3. Simulação para os Valores Otimizados.....	55
6.2. Polietileno.....	58
6.2.1. Análise de Regressão da Superfície de Resposta.....	58
6.2.2. Otimização da Resposta.....	64
6.2.3. Simulação para os Valores Otimizados.....	67
6.3. Eficiência do Planejamento Fatorial.....	68
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>69</b>
7.1. Conclusão Geral.....	69
7.2. Recomendações para Trabalhos Futuros.....	71
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>
<b>APÊNDICE A – Gráficos de pareto para os efeitos padronizados no polipropileno</b> .....	<b>75</b>
<b>APÊNDICE B – Gráficos de otimização e análise de desejabilidade para o polipropileno</b>	<b>76</b>

<b>APÊNDICE C – Resultados das simulações com valores otimizados do polipropileno ...</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE D – Gráficos de pareto para os efeitos padronizados no polietileno.....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE E – Gráficos de otimização e análise de desejabilidade para o polietileno ....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE F – Resultados das simulações com valores otimizados do polietileno.....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE G – Representação gráfica do planejamento composto de face centrada .....</b>	<b>89</b>

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e minha família, que me apoiaram e deram forças em cada projeto, permitindo que eu finalizasse mais esta etapa. Aos professores que me guiaram no conhecimento da ciência dos materiais, em especial ao meu orientador, professor Rannier, que me desafiou com a temática deste trabalho. Aos meus colegas e amigos que caminharam a jornada universitária junto comigo.

## RESUMO

A moldagem por injeção plástica é uma técnica amplamente utilizada em diversas áreas da indústria, da aeroespacial a de embalagens, compondo fatia importante da movimentação financeira no Brasil. Variáveis como tempo de injeção, tempo de resfriamento, temperatura do molde, temperatura da máquina, velocidade de injeção, pressão de injeção, posicionamento do ponto de injeção são importantes para o resultado do processo. Desta forma, este trabalho se propôs a estudar através de análise estatística, a influência do posicionamento do ponto de injeção (PI) no resultado das variáveis temperatura final (TF) e pressão final (PF) de injeção plástica feita por simulação computacional. Para isto foram utilizados os *softwares* Solidworks Plastics® para simulação de injeção plástica e Minitab para análise estatística. Os resultados mostraram que o planejamento fatorial e a metodologia CCD (Central Composite Design) alcançam resultados em uma análise de regressão tão satisfatórios quanto um planejamento com todas as combinações possíveis para as variáveis preditoras. O ponto de injeção apresenta maior influência sobre a variável de resposta PF, podendo também influenciar nos resultados de otimização da temperatura final a depender dos valores simulados. Ao final do processo, a pressão é maior próximo ao ponto de injeção e menor quanto mais longe estiver dele, portanto a localização do PI tem influência sobre problemas relacionados ao recalque e acúmulo de tensões, o que representa perda de propriedades mecânicas, como resistência ao impacto. A TF, por sua vez, é mais influenciada pela Temperatura de Fusão, tendo influência direta nas propriedades químicas do produto final, uma vez que o aumento da temperatura em materiais poliméricos leva a degradação térmica.

**PALAVRAS-CHAVE:** injeção plástica, simulação computacional, ponto de injeção, análise estatística.

## **ABSTRACT**

Plastic injection molding is a technique widely used in several areas of industry, from aerospace to packaging, making up an important part of financial transactions in Brazil. Variables such as injection time, cooling time, mold temperature, machine temperature, injection speed, injection pressure, injection point positioning are important for the process result. Thus, this work proposed to study, through statistical analysis, the influence of the injection point positioning on the result of the variables final temperature and final pressure of plastic injection made by computational simulation. For this, Solidworks Plastics® software was used for plastic injection simulation and Minitab for statistical analysis. The results showed that the factorial design and the CCD methodology achieve results in a regression analysis that are as satisfactory as a planning with all possible combinations for the predictor variables. The injection point has a greater influence on the final pressure response variable, and may also influence the final temperature optimization results depending on the desired result. At the end of the process, the pressure is higher near the injection point and lower the further away from it, so the location of the PI has an influence on problems related to settlement and stress accumulation when related to the final pressure response variable.

**KEYWORDS:** plastic injection, computer simulation injection point, statistical analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos polímeros em função de sua estrutura molecular .....	15
Figura 2 - Estrutura molecular do polipropileno .....	18
Figura 3 - Máquina Injetora .....	19
Figura 4 - Desenho 3D de uma peça feita no Solidworks após simulação de injeção plástica. Fonte: autor .....	23
Figura 5 - Resumo da simulação Solidwork Plastic .....	23
Figura 6 - Alguns resultados obtidos na simulação .....	24
Figura 7 - Desenho técnico do objeto a ser moldado .....	31
Figura 8 - Desenho técnico do objeto a ser moldado .....	31
Figura 9 - Etapa de execução da malha sólida no SolidWorks Plastics .....	32
Figura 10 - Propriedades do material e valores recomendados para o PP Braskem América Inc /F006EC2 .....	34
Figura 11 - Propriedades do material e valores recomendados para o PE-LLD Dow Chemical /Dowlex 2552 E .....	35
Figura 12 - Parâmetros de preenchimento inseridos automaticamente. ....	36
Figura 13 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta TFINAL para o Polipropileno .....	47
Figura 14 - Gráfico de contornos da variável de resposta TFINAL para o Polipropileno .....	48
Figura 15 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta PFINAL para o Polipropileno .....	51
Figura 16 - Gráfico de Contornos da variável de resposta PFINAL para o Polipropileno .....	52
Figura 17 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta TFINAL Para o Polietileno .....	60
Figura 18 - Gráfico de Contornos da variável de resposta TFINAL para o Polietileno .....	61
Figura 19 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta PFINAL para o Polietileno .....	63
Figura 20 - Gráfico de Contornos da variável de resposta PFINAL para o Polietileno.....	64
Figura 21 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável de resposta TFINAL do Polipropileno .....	75
Figura 22 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável de resposta PFINAL do Polipropileno.....	75
Figura 23 - Gráfico de otimização para o caso 1 [mínimizar; mínimizar] do Polipropileno.....	76
Figura 24 - Gráfico de otimização para o caso 2) [máximo; máximo] do Polipropileno.....	77
Figura 25 - Gráfico de otimização para o caso 3) [máximo; mínimo] do Polipropileno .....	78
Figura 26 - Gráfico de otimização para o caso 4) [mínimo; máximo] do Polipropileno .....	79
Figura 27 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável TFINAL do Polietileno	82
Figura 28 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável PFINAL do Polietileno	82
Figura 29 - Gráfico de otimização para o caso 1) [mínimo; mínimo] do Polietileno .....	83
Figura 30 - Gráfico de otimização para o caso 2 [máximo; máximo] do Polietileno .....	84
Figura 31 - Gráfico de otimização para o caso 3 [máximo; mínimo] do Polietileno.....	85
Figura 32 - Gráfico de otimização para o caso 4 [mínimo; máximo] do Polietileno.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis das variáveis independentes para simulações com Polipropileno. ....	37
Tabela 2 - Níveis das variáveis independentes para simulações com Polietileno. ....	37
Tabela 3 - Níveis das variáveis fixas para PP e PE. ....	37
Tabela 4 - Resumo do Planejamento Composto Central. ....	38
Tabela 5 - Resumo dos tipos de pontos. ....	38
Tabela 6 - Planejamento composto Central com níveis codificadores para os fatores .....	39
Tabela 7 - Planejamento Composto Central com 13 corridas, de face centrada e 4 pontos centrais e cubo para o Polipropileno. PI = Ponto de Injeção; TFUSÃO = Temperatura de Fusão .....	39
Tabela 8 - Planejamento Composto Central com 13 corridas, de face centrada e 4 pontos centrais de cubo para o Polietileno. PI = Ponto de Injeção; TFUSÃO = Temperatura de Fusão .....	40
Tabela 9 - Resultados das simulações para o planejamento do Polipropileno; PFINAL e TFINAL são variáveis de resposta. ....	43
Tabela 10 - Tabela de coeficientes codificados para o modelo ajustado da regressão da superfície e resposta para a variável de resposta TFINAL pro polipropileno. ....	44
Tabela 11 - Sumário do modelo de regressão .....	44
Tabela 12 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de .....	45
Tabela 13 - Tabela de coeficientes codificados para a variável de resposta Pressão Final (PFINAL). ....	48
Tabela 14 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de regressão ajustado para a variável de resposta PFINAL do polipropileno .....	49
Tabela 15 - Dados de otimização para o caso 1 (Minimizar, Minimizar) do polipropileno .....	53
Tabela 16 - Dados de otimização para o caso (Maximizar, Maximizar) do polipropileno .....	54
Tabela 17 - Dados de otimização para o caso (Máximizaz, Minimizar) do polipropileno .....	54
Tabela 18 - Dados de otimização para o caso (Minimizar, Maximizar) do polipropileno .....	55
Tabela 19 - Perfil de a) Pressão Final e b) Temperatura Final para os casos de otimização de resposta do processo de injeção plástica do Polipropileno. ....	57
Tabela 20 - Resultados das simulações para o planejamento do Polietileno; Pressão Final e Temperatura Final são variáveis de resposta. ....	58
Tabela 21 - Tabela de coeficientes codificados para o modelo ajustado da regressão da superfície de resposta para a variável de resposta TFINAL pro Polietileno .....	58
Tabela 22 - Sumário do modelo de regressão .....	59
Tabela 23 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de regressão ajustado para a variável de resposta TFINAL do polietileno .....	59
Tabela 24 - Tabela de coeficientes codificados para o modelo ajustado da regressão da superfície de resposta para a variável de resposta TFINAL pro Polietileno .....	61
Tabela 25 - Sumário do modelo de regressão .....	62
Tabela 26 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de regressão ajustado para a variável de resposta PFINAL do polietileno .....	62
Tabela 27 - Dados de otimização para o caso (Mínimo, Mínimo) do polietileno .....	65
Tabela 28 - Dados de otimização para o caso (Máximizaz, Máximizaz) do polietileno .....	65
Tabela 29 - Dados de otimização para o caso (Máximo, Mínimo) do polietileno .....	66
Tabela 30 - Dados de otimização para o caso (Mínimo, Máximo) do polietileno .....	66
Tabela 31 - Perfil de a) Pressão Final e b) Temperatura Final para os casos de otimização de resposta do processo de injeção plástica do Polietileno. ....	67
Tabela 32 - Sumário do modelo de regressão ajustado para .....	68
Tabela 33 - Sumário do modelo de regressão ajustado para .....	69
Tabela 34 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; minimizar) da injeção plástica com Polipropileno .....	80
Tabela 35 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (maximizar; maximizar) da injeção plástica com Polipropileno .....	80
Tabela 36 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; maximizar) da injeção plástica com Polipropileno .....	80
Tabela 37 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; maximizar) da injeção plástica com Polipropileno .....	81

Tabela 38 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; minimizar) da injeção plástica com Polietileno.....	87
Tabela 39 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (maximizar; maximizar) da injeção plástica com Polietileno.....	87
Tabela 40 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (maximizar; minimizar) da injeção plástica com Polietileno.....	87
Tabela 41 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; maximizar) da injeção plástica com Polietileno.....	88

## 1. INTRODUÇÃO

A injeção plástica é uma técnica amplamente utilizada na fabricação de produtos que vão de utensílios domésticos a peças automotivas. São diversos também os problemas decorrentes de defeitos de projeto, à exemplo, bolhas de ar internas podem aparecer por aprisionamento de ar dentro do molde, o que pode gerar preenchimento incompleto da cavidade. Outro problema comum é o rechupe, que é o encolhimento excessivo em alguma região da peça devido ao resfriamento não uniforme (GAVA; MILANEZ, 2019).

O processo de injeção plástica funciona ciclicamente e é iniciado pelo fechamento do molde ainda vazio, então a massa polimérica é aquecida até ser fundida e entra sob pressão no canal de injeção sendo injetada na cavidade da peça a ser moldada, chamado de molde, onde o processo de resfriamento ocorre com auxílio de sistema de arrefecimento até temperatura de extração (GAVA; MILANEZ, 2019).

O sistema de alimentação/distribuição de uma injetora plástica é formado pelos canais de injeção, por onde é transportado o polímero fundido até a entrada do molde, pela bucha fixa, geralmente confeccionada de aço e pelo ponto de injeção que conecta os canais de injeção ao molde, sendo, portanto, parâmetro fundamental e determinante para a qualidade da peça moldada. Com o objetivo de manter propriedades excelentes nos produtos, este sistema deve satisfazer às seguintes condições: permitir preenchimento da cavidade, permitir compactação da peça e não limitar o tempo de ciclo (RICARDO; COSTA; KIAM, 2015).

O ponto de injeção tem diâmetro menor que os canais de alimentação e dimensão proporcional à peça. Em um projeto pode haver um ou mais pontos de injeção em diversos formatos, a depender da geometria da peça que será injetada (GAVA; MILANEZ, 2019).

O CAD (Computer Aided Design – desenho assistido por computador) oferece um modelo gráfico do produto que se deseja desenvolver, podendo ser aplicado a ferramentas de simulação de injeção plástica pelos projetistas. Nesta área, sistemas como Solidworks Plastic® simulam todo o processo de injeção plástica de uma peça apontando possíveis erros, causas e defeitos resultantes

da injeção, permitindo realizar a injeção em condições 'reais', economizando em gastos associados a tempo e possíveis erros de projeto (RICARDO; COSTA; KIAM, 2015).

Ajustes incorretos nos parâmetros da máquina injetora, durante o processo de regulagem do processo de injeção plástica geram perda de qualidade, peças defeituosas, os rejeitos (JÚNIOR *et al.*, 2023).

Em linhas de produção de injeção plástica, quando há defeitos no processo, o responsável deve mudar os valores dos parâmetros de injeção até obter resultados dentro do esperado. Esse método de resolução de problemas não é o mais adequado, considerando a perda de tempo, de material e de energia que se associa a ele. Em casos assim, é considerável se utilizar os conceitos das técnicas de planejamento e análise de experimentos, a fim de reduzir os erros e obter maior segurança nos parâmetros que influenciam a linha de produção (GALDAMEZ; CARPINETTI, 2004).

Associado ao delineamento experimental (DOE – Design Of Experiments), as ferramentas de simulação computacional (CAE – Computer aided engineering) auxiliam na experimentação simulando as condições reais do processos industriais como a injeção plástica, diminuindo os gastos financeiros e de tempo associados ao uso de máquinas, matéria-prima e mão de obra (RICARDO; COSTA; KIAM, 2015).

Um planejamento de análise estatística coopera para se encontrar uma condição de trabalho que aumente a eficiência do processo, utilizando variáveis relevantes e de interesse. Para isso pode-se utilizar o CCD (Planejamento composto central) e o RMS (Metodologia de superfícies de resposta), que são conjuntos de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar um problema que é influenciado pelas variáveis de interesse (AMARAL *et al.*, 2018).

A simulação computacional de processos industriais é um forte aliado da otimização das respostas de trabalho . Programas como Solidworks Plastics® são muito relevantes na expoente evolução da qualidade de produtos moldados por injeção plástica (GUSTAVO; RICARDO, 2021).

## **2. JUSTIFICATIVA**

De todo o lixo produzido no mundo, 12% corresponde aos plásticos, e o consumo deste material tende a crescer 40% até 2030, aumentando conseqüentemente a quantidade deste material descartado que acaba gerando poluição. Além do impacto ambiental, o impacto financeiro de erros de projetos em injeção plástica deve ser considerado como motivador para tal pesquisa. (COSTA *et al.*, 2022).

Devido ao baixo preço e propriedades interessantes como baixo peso e durabilidade, o consumo dos polímeros cresce constantemente. A produção mundial atingiu 359 milhões de toneladas, sendo 40% dessa produção destinada a embalagens. O Brasil encontra-se entre os maiores consumidores de polímeros do mundo, gerando 11,4 milhões de toneladas de resíduos anualmente (PEREIRA; ARAÚJO; BILA, 2021).

Considerando a relevância econômica da produção e consumo crescente de polímeros, a simulação computacional e planejamento experimental com objetivo de aumentar a qualidade dos produtos finais, diminuir custos associados a perda de material e tempo de produção se mostram muito úteis.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo Geral**

Estudar o melhor posicionamento do ponto de injeção para uma geometria simples normalizada através de simulação computacional e análise estatística com o método CCD (Central Composite Design).

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Estudar as coordenadas (ponto) de injeção na peça por simulação computacional, comparando polietileno (PE) e polipropileno (PP);
- Estudar os parâmetros de injeção Temperatura de Fusão (TFUSÃO) e Ponto de Injeção (PI) por simulação computacional, comparando PE e PP;
- Analisar as respostas de injeção Pressão Final (PFINAL) e Temperatura Final (TFINAL), comparando PE e PP, por delineamento experimental por CCD.

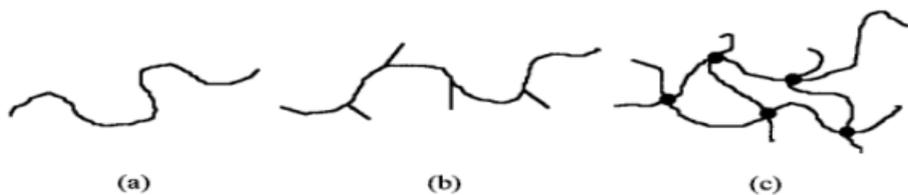
## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Polímeros

Polímeros são formados por cadeias de pequenas moléculas, denominadas monômeros, cuja quantidade determina diversas propriedades da matéria, como a densidade final do mesmo. Também chamados de macromoléculas, são produzidos através de reações químicas de polimerização, que podem unir dezenas e até milhares de monômeros, que, por sua vez, são caracterizados por seu tamanho, estrutura química e interações intramoleculares e intermoleculares. Suas moléculas são ligadas predominantemente por ligações covalentes, o que confere ao material características como a de isolamento elétrico (DE CASTRO; CAVALCANTE; PEDROSA, 2019).

O uso do material polimérico geralmente é justificado pelo baixo preço de sua produção associado às suas boas propriedades. O processo de polimerização pode gerar dois tipos de cadeias, linear, na qual as cadeias crescem em apenas uma direção, e a cadeia ramificada, na qual existem ramificações ligadas à cadeia principal (ASSIS; SANTOS, 2020).

Figura 1 - Classificação dos polímeros em função de sua estrutura molecular: a) cadeia linear, b) cadeia ramificada, c) cadeia com ligações cruzadas. Fonte: (PITT et al., 2011)



Na classificação por origem os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais são aqueles encontrados na natureza, por exemplo as proteínas, polissacarídeos presentes em nosso corpo, látex e o algodão utilizados em processos industriais (DE CASTRO; CAVALCANTE; PEDROSA, 2019). Os polímeros utilizados industrialmente são na sua maioria sintéticos, pois possuem propriedades vantajosas como alta resistência e baixo custo de fabricação e são feitos por meio de reações químicas. Dentre eles estão o PE e o PP, que estão no topo das matérias poliméricas mais utilizadas no cotidiano, o poliestireno (PS), policloreto (PVC), entre outros (ASSIS; SANTOS, 2020).

Podem também ser classificados em dois grandes grupos, os dos termofixos, que após ação da temperatura não podem ser moldados, e o dos termoplásticos, que podem ser moldados várias vezes (NAZÁRIO *et al.*, 2016).

Quando se fala de composição, os polímeros podem ser homopolímeros, formados por um único tipo de monômero, ou copolímeros, constituídos por mais de um monômero. Copolímeros são subdivididos em aleatórios, alternados, em bloco ou grafitizados. Sua estrutura química e interações intra e intermoleculares determinam suas características, que são propriedades interessantes tais como alta flexibilidade, alta resistência ao impacto, baixas temperaturas de processamento, baixa condutividades elétrica e térmica, porosidade, reciclabilidade, dentre outras (ASSIS; SANTOS, 2020).

Quanto à sua propriedade de fusibilidade, os polímeros podem ser classificados em termoplásticos ou termorrígidos. Termoplásticos são formados por macromoléculas lineares ou ramificadas, agrupadas entre si por ligações não permanentes, o que os permite serem moldados várias vezes em processos térmicos diferentes. Os termorrígidos, por sua vez, passam por um processo de “cura” após o ciclo térmico, que é responsável pela formação de ligações cruzadas permanentes entre suas macromoléculas, fortalecendo assim suas estruturas moleculares e dificultando sua fusão pelo calor novamente. Também podem ser classificados quanto à estrutura de sua cadeia molecular como: lineares, ramificadas ou ligações cruzadas; Em função de sua aplicação: commodities, polímeros de engenharia, e até polímeros de alta performance, podendo ter de baixo a alto valor e performance; Ou em função dos grupos funcionais presentes na sua estrutura molecular: poliolefinas, poliésteres, poliéteres, poliamidas (PITT; BOING; BARROS, 2011).

A estrutura química e a morfologia das macromoléculas de um polímero determinam se seu comportamento será elástico ou não. Para cada tipo de polímero existe um mecanismo que determina o seu comportamento em relação a flexibilidade, propriedade que está em função da temperatura. Portanto, para este material existe uma temperatura de transição na qual a mobilidade das cadeias permite que o mesmo retome a sua forma inicial, e é chamada de temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão (SILVA *et al.*, 2014).

A rigidez dos polímeros e dificuldade de fusão estão relacionados à presença de regiões cristalinas, caracterizadas por possuírem maior nível de organização. Desta forma, certos polímeros, termoplásticos semicristalinos, por exemplo, possuem concomitantemente fases cristalizadas e amorfas para temperaturas menores que  $T_m$ , de modo que a fase organizada impede a recuperação instantânea das cadeias, dificulta sua fusão e conseqüentemente aumenta a temperatura de fusão geral do material. Polímeros podem ser biocompatíveis, com aplicação em organismos, e por serem de fácil manufatura podem ser fácil e rapidamente produzidos em sistemas assistidos por computador para impressões 3D, por exemplo (SILVA *et al.*, 2014).

#### 4.2. Polietileno

O polietileno é um polímero termoplástico obtido pela polimerização do etileno, não linear e de baixa densidade (DIAS DE ARAÚJO *et al.*, 2017). O polietileno se destaca em virtude de ser um tipo de polímero com elevada produção em nível mundial, o que lhe confere custo baixo, além de sua durabilidade. Tais características o fazem interessante para a produção de diversos tipos de embalagens e outros objetos como sacolas plásticas, por exemplo, que são usualmente descartados após utilização (ASSIS; SANTOS, 2020).

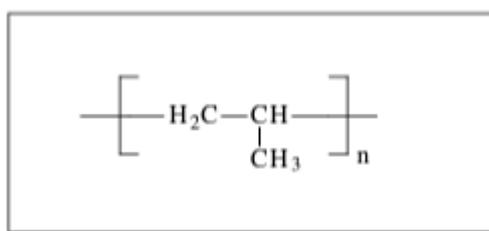
O monômero base para o polietileno, o etileno, é obtido através de um processo de várias etapas a partir do petróleo. Por meio da destilação fracionada obtém-se várias frações de petróleo, dentre elas a nafta, fração a partir da qual são obtidos os monômeros, que passa por um processo de craqueamento dando origem a várias substâncias como o etileno e o propileno, que é o monômero base do polipropileno (PP) (ASSIS; SANTOS, 2020).

O Polietileno Linear de Baixa Densidade é composto de moléculas lineares de polietileno com grupos alquilas ligados, produzidos por copolimerização do eteno com 1-alcenos. O PELBD possui o mesmo conceito químico de densidade do PEBD, pois nos dois as ramificações impedem a cristalização em algumas extensões, reduzindo o empacotamento das cadeias e também a densidade. Segundo a classificação da ASTM D1248-05 esse tipo de resina I PELBD possui faixa de densidade entre 0,90 a 0,925 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.3. Polipropileno

O polipropileno é um termoplástico linear de alta cristalinidade da família das poliolefinas, com amplas propriedades mecânicas, como alto ponto de fusão e resistência mecânica das regiões cristalinas a altas temperaturas. Subproduto gasoso do refino do petróleo, é um hidrocarboneto insaturado, com três átomos de carbono e seis átomos de hidrogênio. (ROSÁRIO *et al.*,2011). É originário de monômeros de hidrocarboneto alifático insaturado, contendo uma dupla ligação carbono-carbono reativa, podendo ter suas propriedades mecânicas melhoradas quando associado a reforços de fibras de vidro (MONTEIRO *et al.*, 2022).

Figura 2 - Estrutura molecular do polipropileno.



Possui ponto de fusão maior que a maioria das poliolefinas, que é o resultado da presença do grupo lateral metil gerando maior rigidez estrutural, podendo chegar ao máximo de 176 °C para o polipropileno isotático e 135 °C para o sindiotático, esse ponto de fusão, no entanto, sempre dependerá da porcentagem de fase cristalina no polímero (ROSÁRIO *et al.*,2011).

Sua adequação a variados processos de transformação e baixo custo possibilitaram o aumento exponente de sua utilização para diversas indústrias, que se aproveitam da combinação de propriedades térmicas e mecânicas, incluindo excelente resistência química e à umidade, razoável ductilidade com boa rigidez e baixa densidade. Assim como as poliolefinas, é biologicamente resistente a microorganismos, não sofre ataque biológico e não causa reações fisiológicas, sendo por isso, utilizado em fins terapêuticos como suturas. Por ser inerte é utilizado em embalagens alimentícias. Sua alta cristalinidade confere propriedades mecânicas amplas, o tornando de grande uso industrial, pois pode ser conformado pelas principais técnicas de processamento: moldagem por injeção, filmes, termoformagem e moldagem por sopro (ROSÁRIO *et al.*, 2011).

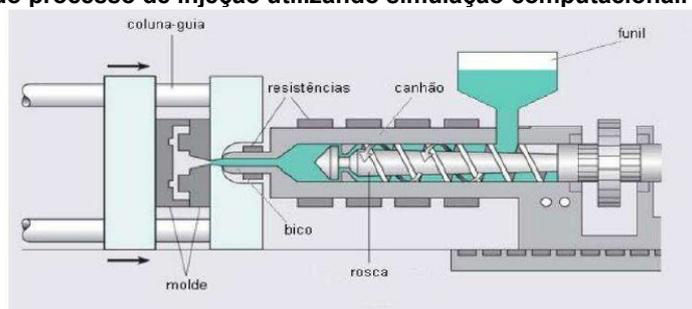
É muito resistente a substâncias químicas, mas pode ser atacado por agentes inorgânicos como ácido sulfúrico concentrado e ácido nítrico fumegante. É muito utilizado em embalagens de alimentos sensíveis a umidade e gordura, devido a sua inércia química, e também pode ser utilizado em suturas, pois possui resistência biológica a micro-organismos e não causa reações biológicas (MONTEIRO *et al.*, 2022).

Polímero de grande uso industrial, pode ser conformado segundo as principais técnicas de processamento, incluindo a moldagem por injeção. Por esse processo é possível fabricar vasilhames fechados, tendo grande uso na área médica devido à possibilidade de ser esterilizado. Peças de polipropileno são feitas por injeção principalmente para a indústria automotiva (ROSÁRIO *et al.*, 2011).

#### 4.4. Injeção Plástica

A injeção plástica é um processo utilizado na fabricação de peças que necessitam de acabamento e garantia dimensional do produto melhores. A partir do material polimérico a máquina injetora é capaz de gerar produtos de diversas formas, para isso os grãos são aquecidos até estarem na forma pastosa, para serem pressionados pelo êmbolo do equipamento para dentro do molde pré-aquecido. Após o resfriamento apropriado do molde, a peça pode ser retirada sem que haja danos dimensionais a sua estrutura (ESTORILIO; HATAKEYAMA, 2018).

Figura 3 - Máquina Injetora. Fonte: KARAM, Marcellly Lullez. Análise da influência de parâmetros do processo de injeção utilizando simulação computacional.



Diversos fatores precisam ser avaliados e acompanhados durante o processo de injeção para se manter a qualidade da peça injetada no que diz respeito aos parâmetros de projeto. Entre os itens críticos estão: ponto de

injeção, gradiente de pressão nas linhas de fluxo, manutenção das tensões de cisalhamento críticas, prevenção contra linhas de solda devido a baixas temperatura, balanceamento adequado para o preenchimento do molde e canais de alimentação, prevenção contra degradação do material, tempo de ciclo do processo, que começa no fechamento do molde, passa pela injeção do material, permanência do pistão ou recalque, pelo retorno do pistão, resfriamento do molde, abertura do molde e finaliza com a extração da peça (ESTORILIO; HATAKEYAMA, 2018).

#### **4.5. Molde de Injeção Plástica**

Para o processo de injeção plástica, o molde é um dos componentes mais importantes, pois possui as cavidades que receberão o material fundido e que dará forma a peça projetada, devendo ter sua temperatura controlada durante a injeção, servindo como parâmetro para controle de defeitos (GAVA; MILANEZ, 2019).

O material polimérico fundido entra sob pressão do êmbolo no molde, fluindo pelos canais de alimentação, sendo então solidificado pelo sistema de arrefecimento até temperatura viável para extração. É necessário considerar o projeto dimensional da peça a ser moldada para gerar um molde adequado (GAVA; MILANEZ, 2019).

#### **4.6. Ponto de Injeção Plástica**

O ponto de injeção (PI) é o local do molde onde um bico de injeção será posicionado e através do qual a massa polimérica líquida será injetada. Este parâmetro é um dos fatores críticos para a qualidade do processo e do produto acabado, e sua localização deve ser apropriada, permitindo que o material chegue nas extremidades da peça ao mesmo tempo em todas as direções (ESTORILIO; HATAKEYAMA, 2018).

O diâmetro do ponto de injeção é menor que o dos canais de alimentação, podendo ser diretamente proporcional ao tamanho da peça e à fluidez do polímero. Pode ter diversos formatos, atendendo a particularidades do processo,

além de visar o tipo de corte desejado, que pode ser automático ou manual (GAVA; MILANEZ, 2019).

#### 4.2. **Parâmetros da Injeção Plástica e Defeitos do Produto Final**

Rebarba ou falha, deformação geométrica do componente, erros dimensionais, bolhas de ar, as linhas de solda e fragilização do componente, são os principais defeitos que podem ocorrer nesse processo, devido à variação dos parâmetros de injeção. Um mesmo problema, por sua vez, pode ter várias causas prováveis (GAVA; MILANEZ, 2019).

Estes defeitos podem estar associados à construção do molde, sua temperatura, pressão de injeção, temperatura de processamento e posicionamento do ponto de injeção, por exemplo. Gases aprisionados podem gerar preenchimento incompleto, o que pode ser evitado criando pequenos pontos de escape no molde. Já os defeitos de rechupe, bem comuns neste tipo de processo, podem estar ligados a temperatura do molde, pressão de recalque, e vários outros parâmetros (GAVA; MILANEZ, 2019).

#### 4.7. **Simulação Computacional**

A simulação computacional através da plataforma Solidworks Plastics®, é uma ferramenta utilizada para prever as condições e propriedades finais de um objeto polimérico produzido pelo processo de injeção. As condições da injeção plástica são determinadas dentro do *software*, pelo usuário, ou de forma padrão, pelo próprio sistema.

O objetivo do uso deste tipo de solução é economizar tempo e matéria prima, prioritariamente. É certo que sua utilização traz muitos benefícios, como a possibilidade de mudança de projeto diante de análise rápida, resultados produzidos quase que instantaneamente, correção de defeitos sem a necessidade de parada de linha de produção e antes de iniciar a fabricação. A aplicação da simulação computacional dá possibilidade ao usuário de desenvolver um produto de alta qualidade e produzi-lo em um processo de alta eficiência, entregando para o cliente um item de valor adequado, diminuindo o tempo de entrega e gastos em matéria-prima, devido a resolução dos possíveis problemas de produção ainda na etapa de simulação, dando ao processo alta rentabilidade (ESTORILIO; HATAKEYAMA, 2018).

#### 4.8. Solidworks Plastics

SOLIDWORKS® é um *software* de CAD (*Computer Aided Design*) 3D desenvolvido pela SolidWorks Corporation. Oferece um ambiente para modelagem de peças e montagem em 2D e 3D, além de diversas extensões, como o Solidworks Plastics®, que simula a injeção plástica de peças projetadas na plataforma (HELP SOLIDWORS, 2023).

A simulação conta com algumas etapas primordiais para sua execução, dentre elas: Desenho 3D da peça para simulação, Determinação da malha sólida, Determinação do ponto de injeção, Determinação do material polimérico utilizado (4IENG, 2021). Essas informações são suficientes para o sistema simular o processo de injeção plástica, no entanto, diversas outras variáveis podem ser modificadas, como pressão de injeção e velocidade, além das informações sobre o polímero e o molde, o sistema de resfriamento e configurações de preenchimento, recalque e empenamento.

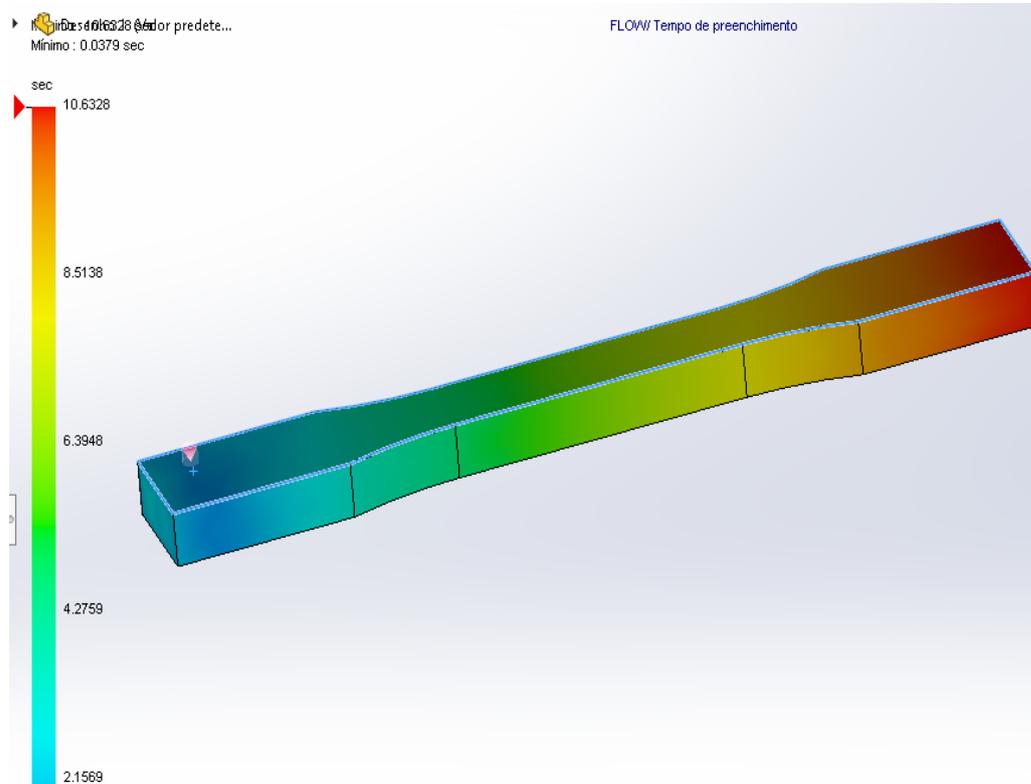
A plataforma oferece uma biblioteca com os polímeros mais conhecidos, suas respectivas propriedades e informações de fabricantes. Além disso, permite que um novo material seja adicionado, desde que o usuário possua todas as informações necessárias sobre o mesmo, a fim de que a simulação possua todas as variáveis necessárias para os cálculos a serem executados (HELP SOLIDWORS, 2020). Uma simulação de injeção plástica oferece como resultado dados importantes para que o projetista aprove ou modifique o projeto. Dentre os principais resultados estão:

- a) Tempo de preenchimento
- b) Pressão ao final do preenchimento
- c) Temperatura ao final do preenchimento
- d) Tensão de cisalhamento ao final do preenchimento
- e) Contração volumétrica ao final do preenchimento
- f) Tempo de solidificação ao final do preenchimento

Além dos valores numéricos para os dados anteriores, o *software* também entrega um relatório sobre cada um. À exemplo, a seguir são exibidas algumas das informações citadas, tendo essas sido obtidas da simulação de injeção de

uma peça de geometria simples padronizada (Figura 4), com variáveis de valores arbitrários, Figura 5 e Figura 6.

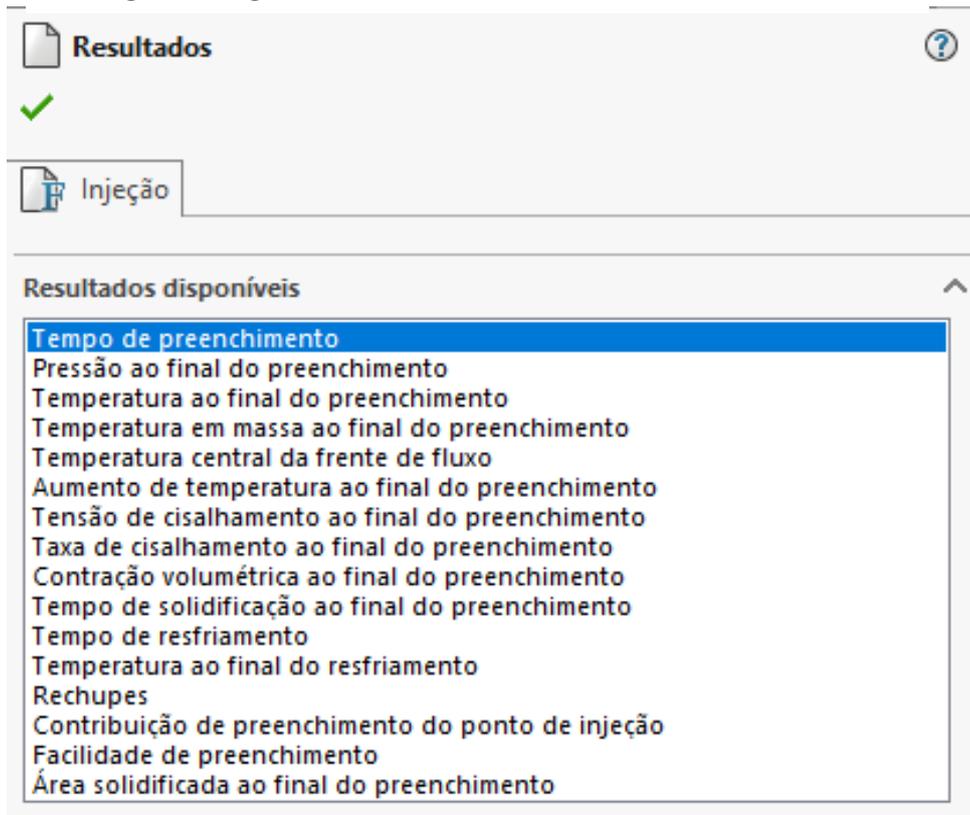
**Figura 4 - Desenho 3D de uma peça feita no Solidworks após simulação de injeção plástica. Fonte: autor**



**Figura 5 - Resumo da simulação Solidwork Plastic. Fonte: autor**

Tipo : Sólido  
Elemento : 3317  
Nó : 2248  
Material : PP  
Produto : "(P) Generic material / Generic material of PP"  
Configuração : Valor predeterminado [ Desenho 1 ]

Figura 6 – Alguns resultados obtidos na simulação. Fonte: Autor.



#### 4.9. Geração de Malhas e Elementos Finitos

Antes de realizar a simulação de injeção propriamente dita, é necessário criar um modelo matemático formado por uma malha de elementos finitos, que é uma “rede” de elementos geométricos (triangulares, tetraédricos ou cilíndricos) conectados por “nós” nas suas extremidades. O *software* SolidWorks Plastics® utiliza o método dos elementos finitos, onde a geometria da peça é dividida em pequenas partes ou elementos (GUSTAVO; RICARDO, 2021).

A discretização de uma peça barateia o desenvolvimento de novas peças, além de ser necessária para o desenvolvimento das equações matemáticas que explicam o processo simulado, simplificando também os cálculos executados pelo computador (GUAMÁN *et al*, 2019).

#### 4.10. Planejamento Experimental

O planejamento experimental consiste em implementar técnicas na organização de projetos com o objetivo de identificar os parâmetros de controle do processo que mais influenciam em seus resultados, em outra perspectiva, identificam quais parâmetros que mais ocasionam problemas de qualidade no

produto final, além de determinar os melhores valores ajustados para minimizar esses problemas (GALDAMEZ; CARPINETTI, 2004).

O planejamento estatístico de um experimento ou condição de processo, feita por um pesquisador tem como benefícios, a redução do número total de experimentos, a economia de tempo e custos com reagentes, materiais e análises, além de chegar a conclusões com significância estatística, o que traz confiabilidade para confirmar os dados gerados.

Há diversos tipos de planejamentos fatoriais, conforme tipos e quantidade de variáveis considerada, e são utilizados conforme objetivo de pesquisa. Planejamentos fatoriais de dois níveis (completos ou fracionários) podem estimar os efeitos principais e interações, já os de três níveis (com pontos centrais) podem estimar, além disso, o grau de curvatura na resposta (TEÓFILO; FERREIRA, 2006).

Para dados experimentais cujo comportamento possua curvatura, o planejamento precisa ter pelo menos três níveis. O que pode ser feito através de matrizes experimentais que permitem o ajuste de funções de segunda ordem, dentre os quais estão: Box-Behken, Doehlert e Composto Central (NOVAES *et al.*, 2017).

#### 4.11. Superfície de Resposta

A metodologia de superfícies de respostas (MSR) possui alta eficiência, poder de modelagem e capacidade de exploração dos sistemas estudados. É a combinação de técnicas de planejamento de experimento, análise de regressão e métodos de otimização e se baseia no ajuste de modelos matemáticos para os dados experimentais de forma a descrever o comportamento desses dados e gerar previsões estatísticas (AMARAL *et al.*, 2018).

Pode ser descrita como a combinação de técnicas de planejamento de experimentos, análise de regressão e métodos de otimização e se baseia no ajuste de modelos matemáticos empíricos aos dados experimentais obtidos a partir de um planejamento experimental. O seu objetivo é descrever o comportamento dos dados resultantes desse planejamento e fazer previsões estatísticas válidas, sendo, portanto, utilizada para quantificar e interpretar as relações entre as respostas e os efeitos dos fatores. Os valores que as variáveis

podem admitir são definidos como níveis de uma variável. Esses valores afetam o resultado dos experimentos através de seus efeitos principais e de interação com outras variáveis, que podem ou não estar sendo avaliadas, podendo ser alteradas de forma independente na aplicação da matriz experimental (NOVAES *et al.*, 2017).

Sendo um conjunto de técnicas de design de experimentos que ajudam a melhorar e otimizar respostas, é usada para refinar modelos depois de se determinar os fatores ou variáveis importantes para o mesmo. Uma equação de Superfície de Resposta possui termos quadráticos que permitem modelar a curvatura na resposta, o que é útil para determinar como as mudanças nas variáveis afetam a resposta de interesse, para encontrar os níveis que otimizam uma resposta e selecionar condições de operação para atender às especificações de projeto. Existem dois principais tipos de projetos de Superfície e Resposta: Planejamento Compostos Centrais (CCD – Central Composite Design) e Projetos Box-Behnken (SUPPORT MINITAB, 2023).

#### 4.12. CCD – Planejamento Composto Central

O CCD (*Central Composite Design*) é um conjunto de ferramentas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse sofre influência de diversas variáveis. Essa análise é feita em termos de uma Superfície de Resposta. O planejamento composto central deve ser utilizado quando se quer verificar a curvatura de um plano; ou seja, quando se quiser verificar a existência de termos quadráticos no modelo de regressão resultante da aplicação do método. Esse tipo de planejamento consiste em uma parte referente ao planejamento fatorial  $2^k$  (ou de um planejamento fracionário, com resolução V), com nF corridas, 2k corridas axiais ou estrela e nc corridas centrais (AMARAL *et al.*, 2018a).

Um Planejamento Composto Central irá estimar os coeficientes de um modelo quadrático que será descrito matematicamente em uma equação de regressão. Todos os valores de pontos, que são os valores para as variáveis de influência estudadas, serão representados em termos de valores codificados dos fatores (STATE EASE, 2023), como é feito na Tabela 6 são descritos os valores

codificados para as variáveis de interesse (ou variáveis preditoras) TFUSÃO e PI para o processo de injeção plástica.

Recomendado para projetos que precisam de experimentação sequencial, em um Arranjo Composto Central são gerados três grupos distintos de elementos ou pontos experimentais: um fatorial completo ou fracionário: (-1, -1) (+1, -1) (-1, +1) (+1, +1), um conjunto de pontos centrais:  $(-\alpha, -1)$ ,  $(0, 1)$  e  $(+\alpha, +1)$ ; e um grupo de níveis extras denominados pontos axiais:  $(-\alpha, 0)$ ,  $(+\alpha, 0)$ ,  $(0, -\alpha)$  e  $(0, +\alpha)$ . O número de pontos axiais é o dobro do número de fatores e representa os valores extremos de cada fator, podendo ser circunscritos (CCD original), inscritos ou de face centrada (quando as variáveis possuem valores limitantes), a depender da sua localização (SUPPORT MINITAB, 2023).

No APÊNDICE G é exemplificado o Planejamento Composto Central de Face Centrada para as variáveis TFUSÃO e PI da injeção plástica do Polipropileno.

#### 4.13. Análise de Regressão

Em estatística, regressão é uma técnica que permite quantificar e inferir a relação de uma variável dependente com variáveis independentes. A análise da regressão pode ser usada como um método descritivo da análise de dados e permite estabelecer modelos de previsão. Uma regressão simples considera uma única variável explicativa, e múltipla, considera a inclusão de duas ou mais variáveis simultaneamente (CHAVES *et al.*, 2010).

Dentre as principais respostas geradas pelo modelo de regressão estão a tabela de Coeficiente Codificados, Sumário do Modelo, tabela de Análise de variância e a equação de regressão para o modelo ajustado. Os termos  $R^2$ ,  $R^2$  ajustado, contribuição e outros também são de grande relevância para a análise estatística, e são explicados no item 4.15. Respostas importantes para análise .

#### 4.14. Equação de Regressão

Um modelo de regressão pode ser descrito na forma de um polinômio de segunda ordem, em que a resposta  $\hat{y}$  é relacionada às variáveis  $x_i$  através da equação a seguir:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Equação 1}$$

Na Equação 1  $k$  é o número de variáveis,  $\beta_0$  o termo constante,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$  e  $\beta_{ii}$  são os parâmetros de regressão para os efeitos dos coeficientes de interação linear e quadrático, e  $\varepsilon$  é o resíduo, ou seja, a diferença entre as respostas experimental e a prevista pelo modelo (AMARAL *et al.*, 2018a).

A equação do modelo de regressão é o ajuste das respostas dos experimentos e é capaz de descrever o comportamento das respostas de acordo com a variação dos níveis das variáveis (SUPPORT MINITAB, 2023).

#### 4.15. Respostas importantes para análise

É necessário certificar-se de que o modelo matemático ajustado é adequado para descrever o comportamento dos dados experimentais. Isso pode ser feito através da análise de algumas respostas geradas pelo *software* estatístico.

**R<sup>2</sup>:** representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo. Ele é calculado como 1 menos a razão da soma dos quadrados dos erros (que é a variação que não é explicada pelo modelo) para a soma total dos quadrados (que é a variação total no modelo), determina se o modelo ajusta bem os dados. Quanto mais alto o valor de R<sup>2</sup> melhor o modelo ajusta seus dados. O valor de R<sup>2</sup> está sempre entre 0 e 100% (NOVAES *et al.*, 2017).

**R<sup>2</sup> ajustado:** é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores do modelo em relação ao número de observações. O R<sup>2</sup> ajustado é calculado como 1 menos a razão entre o quadrado médio do erro (QME) em relação ao quadrado médio total (QM total). Use o R<sup>2</sup> ajustado quando desejar comparar modelos que têm diferentes números de preditores. R<sup>2</sup> sempre aumenta quando você adiciona um preditor ao modelo, mesmo quando não existe uma verdadeira melhoria ao modelo. O valor de R<sup>2</sup> ajustado incorpora o número de preditores no modelo para ajudá-lo a escolher o modelo correto (NOVAES *et al.*, 2017).

**CONTRIBUIÇÃO:** A contribuição exibe a porcentagem que cada fonte contribui para a variação total na resposta. Percentagens mais elevadas indicam que a

fonte é responsável por mais da variação na variável de resposta. A contribuição percentual para o modelo de superfície de resposta é a mesma que para o  $R^2$  (MAINARDI; DINO BIDOIA, 2020).

**VALOR-P:** O valor-p é uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula. A hipótese nula para o modelo é que o modelo não explica nenhuma variação na resposta. As probabilidades inferiores fornecem evidências mais fortes contra a hipótese nula, denotando relevância do modelo ou variável sobre determinada resposta. Para determinar se o modelo explica a variação na resposta, é necessário comparar o valor-p do modelo com o seu nível de significância, que geralmente, abaixo de 0,05 funciona bem. Esse nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de concluir que o modelo explica a variação na resposta quando isso não acontece, em outras palavras, o modelo ou variável tem apenas 5% de chance de não explicar a resposta ou ser relevante sobre ela (NOVAES *et al.*, 2017).

**Valor-p  $\leq \alpha$ : o modelo explica a variação na respostas:** Se o valor-p for menor ou igual ao nível de significância, você conclui que o modelo explica a variação na resposta.

**Valor-p  $> \alpha$ : não há evidências suficientes para concluir que o modelo explica a variação na resposta:** Se o valor-p for maior ou igual ao nível de significância, não é possível concluir que o modelo explica a variação na resposta. Talvez seja necessário ajustar um novo modelo.

#### 4.16. Otimização de Resposta (Determinação de condições ótimas)

A otimização objetiva melhorar o desempenho de um processo ou produto para que se obtenha do mesmo o máximo de benefícios possíveis, à partir da definição de alguns parâmetros do processo (DOTTI *et al.*, 2022).

Processos de otimização tradicionais permitem o monitoramento da influência de uma variável por vez sobre os resultados de um processo experimental, diferente do métodos de superfície de respostas, que permite uma análise multivariada (FERREIRA *et al.*, 2017).

A determinação das condições ótimas para dados modelados pode ser realizada a partir da equação da regressão obtida ou por simples análise visual das superfícies de respostas. Em modelos quadráticos, o ponto crítico pode ser

de máximo, mínimo ou sela e é possível calcular suas coordenadas através das primeiras derivadas da função matemática que descreve a superfície de resposta igualando-a a zero Eq.2 e Eq.3 (AMARAL *et al.*, 2018).

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = b_1 + 2b_{11}x_1 + b_{12}x_2 = 0 \quad \text{Equação 2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = b_2 + 2b_{22}x_2 + b_{12}x_1 = 0 \quad \text{Equação 3}$$

#### 4.17. O método da Desejabilidade

Em 1980, Derringer e Suich propuseram a aplicação da função da desejabilidade, utilizada quando há necessidade de se otimizar várias respostas ao mesmo tempo. O método em questão utiliza ferramentas matemáticas para encontrar valores para as variáveis preditoras que otimizem as variáveis de resposta, ao mesmo tempo que avalia a própria capacidade do método de chegar às respostas esperadas através das desejabilidades individual e composta. A desejabilidade abrange uma amplitude de zero a um. O valor 1 representa o caso ideal; zero indica que uma ou mais respostas estão fora dos seus limites aceitáveis. A desejabilidade global (D), Equação 4, é a média geométrica ponderada das desejabilidades individuais para as respostas (NOVAES *et al.*, 2017).

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} \quad \text{Equação 4}$$

-m é o número de respostas estudadas no processo de otimização.

Desejabilidade individual e composta avaliam em que medida uma combinação de variáveis satisfaz as metas definidas para as respostas. A desejabilidade individual (d) avalia como as definições otimizam uma resposta única; a desejabilidade composta (D) avalia como as definições otimizam um conjunto global de respostas (FERRI *et al.*, 2021).

## 5. METODOLOGIA

Neste trabalho, o problema estudado é o efeito do posicionamento do bico de injeção sobre as propriedades finais de um produto polimérico a partir da sua influência nas variáveis de resposta Temperatura Final e Pressão Final. Para tal,

é feito um planejamento experimental a fim de se obter dados estatisticamente válidos com o mínimo de experimentos realizados.

### 5.1. Dimensões e Geometria de Estudo

Foi considerada uma estrutura geométrica 3D simples, conforme imagens abaixo (Figura 7 e Figura 8), de uma amostra padronizada pela norma ASTM D638-14, no formato conhecido como “borboleta” ou “gravata”.

Figura 7 - Desenho técnico do objeto a ser moldado

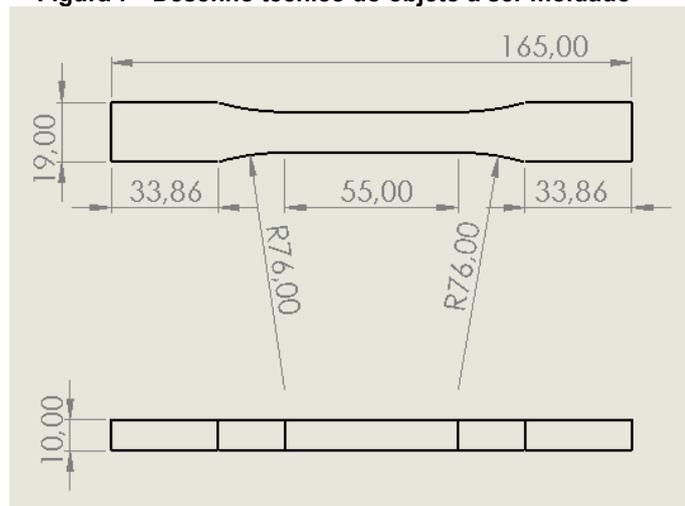
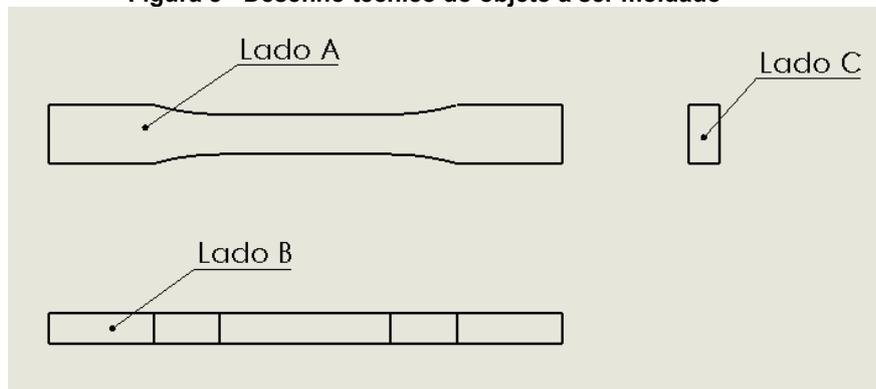


Figura 8 - Desenho técnico do objeto a ser moldado



O processo de injeção foi simulado em dois tipos de materiais, polietileno e polipropileno e a investigação feita neste trabalho considerou apenas pontos de injeção do lado A do desenho.

### 5.2. Máquina Virtual Injetora

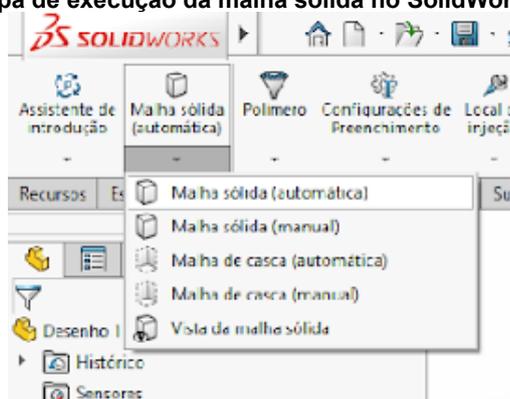
A máquina virtual utilizada neste estudo é parte do *software* Solidworks Plastics® e oferece análises do processo de injeção plástica a partir de uma robusta base de dados, analisando as condições de processo imputadas pelo desenvolvedor.

Possui as características de uma máquina injetora universal e simula seu funcionamento permitindo o controle de diversos parâmetros como temperatura de fusão, ponto de injeção e muitos outros, como citado anteriormente.

### 5.3. Malha Sólida

Antes da simulação sob as condições planejadas é necessário criar uma malha sólida para a peça (Figura 9).

Figura 9 - Etapa de execução da malha sólida no SolidWorks Plastics



A criação de malha ou discretização, como é descrita por alguns autores, é a divisão da peça a ser moldada em partes menores, que são polígonos diversos (triângulos, retângulos, quadrados, etc.).

Segundo o guia de informações do *software* SolidWorks Plastics®, quando o usuário cria a malha para um modelo, o *software* gera uma mistura de elementos sólidos, de casca, de mola e de contato com base na geometria criada. Para o caso da Malha Sólida, o programa cria uma malha sólida com elementos sólidos 3D tetraédricos para todos os componentes sólidos na pasta Peças. Os elementos tetraédricos são apropriados para objetos volumosos.

Como a peça a ser injetada neste trabalho possui geometria simples, sem detalhes, furos ou ranhuras, não foi necessário o refinamento da malha gerada pelo programa, que é uma discretização em elementos menores com o objetivo

de dar maior precisão aos cálculos. Além disso, como o indicado é que o ponto de injeção seja localizado na face de maior espessura, as simulações ocorreram para pontos no lado A.

Apesar de o Solidworks Plastics® dar também a opção de malha de casca, escolheu-se para este trabalho a malha sólida, pois é a opção que gera os resultados Temperatura Final e Pressão Final para todos os pontos de injeção analisados. Além de permitir escolher pontos de injeção mais próximos dos sugeridos pelo delineamento experimental.

#### **5.4. Polímeros e Parâmetros de Injeção**

Polietileno e Polipropileno são termoplásticos, o polietileno é uma resina que possui resistência química superior à do polipropileno. Tanto o PP como o PE estudados neste trabalho possuem Tg igual a 108 °C.

As matérias primas poliméricas utilizadas foram escolhidas da biblioteca do SolidWorks Plastics®, e são:

- Polipropileno F006EC2, produzido pela Braskem e Polietileno Dowlex 2552 E, da fabricante Dow Chemical. Polipropileno F006/EC2, é do subgrupo dos homopolímeros, cuja cadeia principal é formada por um único mero (ou polímero formado a partir de um único monômero) .

**Figura 10 - Propriedades do material e valores recomendados para o PP Braskem América Inc /F006EC2**

PP : (P) Braskem America Inc / F006EC2	
Temperatura de fusão	249 °C
Temperatura máx. de fusão	255 °C
Temperatura mín. de fusão	242 °C
Temperatura do molde	35 °C
Temperatura máx. do molde	49 °C
Temperatura mín. do molde	21 °C
Temperatura de extração	97 °C
Temperatura de transição vítrea	108 °C
Viscosidade : 7-Parameters Modified Cross mode	1.92686e+17 263.15 0 34.52 51.6 638360 0.19118
PVT : Modified Tait eqn	1.288 0.001008 9.08322e+08 0.006115 1.191 0.000684 1.04847e+09 0.01004 426.15
Aquecimento específico : Constant	2903 J/(Kg-K)
Condutividade térmica : Constant	0.161 W/(m-K)
Módulo elástico : Constant	1.346e+10 1.293e+10
Poisson : Constant	0.449 0.473
Coefficiente de expansão térmica : Constant	0.000123 0.000132
Módulo de relaxamento de cisalhamento : Not Av	NULL
Modelo de cura : Not Available	NULL
Temperatura sem preenchimento	NULL
Vazão do material derretido	0.6 g/10min
% Fibra	NULL
Taxa de cisalhamento máx.	100000 1/s
Tensão máxima de cisalhamento	250000 Pa
Coefficiente óptico de tensão	NULL
Parâmetros de Leonov	NULL
Parâmetros WLF	NULL
Módulo de cisalhamento paralelo	NULL
Cinética da cristalização : Not Available	NULL
Fonte de dados	NULL

- Polietileno Linear de baixa densidade, da fabricante Dow Chemical / DOWLEX 2552 E. É do grupo dos polímeros lineares de baixa densidade, possui baixo teor de ramificações curtas e ausência de ramificações longas, sendo por isso altamente cristalino. Apresenta fluidez e flexibilidade boas.

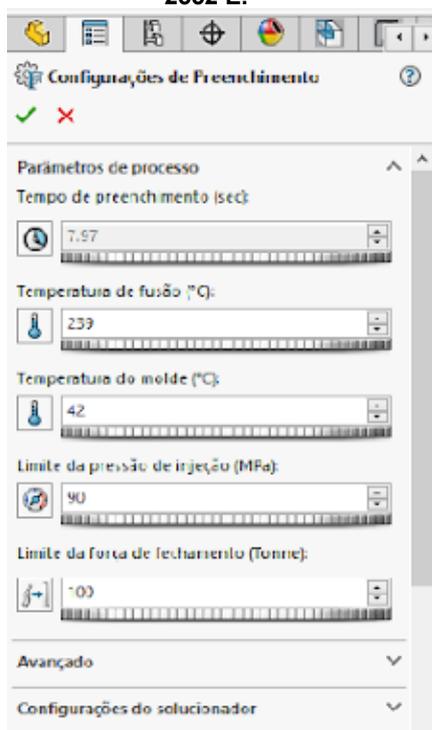
**Figura 11 - Propriedades do material e valores recomendados para o PE-LLD Dow Chemical /Dowlex 2552 E**

PE-LLD : (P) Dow Chemical / DOWLEX 2552 E	
Temperatura de fusão	239 °C
Temperatura do molde	42 °C
Temperatura de extração	96 °C
Temperatura de transição vítrea	108 °C
Viscosidade : 7-Parameters Modified Cross m	1.041e+11 263 0 19.59 51.6 1.909e+06 0.2646
PVT : Modified Tait eqn	1.261 0.001019 9.37e+08 0.004565 1.133 0.0005795 1.804e+09 0.002664 394.
Aquecimento específico : Constant	3180 J/(Kg-K)
Condutividade térmica : Constant	0.225 W/(m-K)
Módulo elástico : Constant	6.9e+09 6.9e+09
Poisson : Constant	0.41 0.41
Coefficiente de expansão térmica : Constant	0.000122 0.000122
Módulo de relaxamento de cisalhamento : No	NULL
Modelo de cura : Not Available	NULL
Temperatura sem preenchimento	NULL
Vazão do material derretido	NULL
% Fibra	NULL
Taxa de cisalhamento máx.	100000 1/s
Tensão máxima de cisalhamento	505000 Pa
Coefficiente óptico de tensão	NULL
Parâmetros de Leonov	NULL
Parâmetros WLF	NULL
Módulo de cisalhamento paralelo	NULL
Cinética da cristalização : Not Available	NULL
Fonte de dados	NULL

As matérias primas estudadas diferem em diversas propriedades, dentre elas estão a faixa de temperatura de fusão (entre 242 e 255°C para o polipropileno e entre 232 e 255°C para o polietileno), condutividade térmica (0,161 W(m-k) para o polipropileno e 0,225 W(m-k) para o polietileno).

Os parâmetros de preenchimento (Figura 12) são dados preenchidos automaticamente conforme informações do fabricante, que constam na ficha do polímero selecionado no banco de dados do Solidworks Plastics®.

Figura 12 - parâmetros de preenchimento inseridos automaticamente na máquina virtual a partir de dados da base contida no SolidWorks Plastics para o polímero PE-LLD Dow Chemical / Dowlex 2552 E.



Em Configurações de Preenchimento os parâmetros de injeção podem ser modificados para uma simulação conforme interesse do desenvolvedor, porém possuem valores máximo e mínimo, não podendo serem simulados fora desses.

Para os fins de interesse deste trabalho, temperatura de fusão são alterados juntamente com o ponto de injeção, para se entender de que maneira este influencia nas variáveis de resposta Temperatura Final e Pressão Final, permanecendo fixos os parâmetros Temperatura do molde e Pressão de Injeção. Os valores utilizados para estes parâmetros estão definidos no tópico a seguir.

### 5.5. Definição dos Níveis das Variáveis Independentes

Tanto para o Polietileno como para o Polipropileno o limite de pressão de injeção utilizado foi o valor mínimo de 100 Mpa indicado pela literatura, que é o suficiente para que em condições controladas o processo gere um preenchimento de 100% da peça moldada. Os valores de mínima e máxima temperatura de fusão (Tabela 1) também foram informados pelo fabricante e retirados da biblioteca do *software*.

Os pontos de injeção estão dentro do limite longitudinal da face A, com 165mm de comprimento, sendo assim seu mínimo está em 0,00 mm e o máximo em 165,0 mm, conforme indicado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Níveis das variáveis independentes para simulações com Polipropileno.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Temperatura de Fusão (°C)	242	255
Ponto de Injeção (mm)	0,00	165

Para o polietileno selecionado a biblioteca do SolidWorks Plastics® não informa limites de temperatura de fusão, apenas um valor fixo médio, portanto foram feitas simulações iniciais para determinar uma faixa de valores em que o processo ocorra de forma a preencher 100% da peça moldada. Desta maneira verificou-se os seguintes valores (Tabela 2):

**Tabela 2 - Níveis das variáveis independentes para simulações com Polietileno.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Temperatura de Fusão (°C)	232	245
Ponto de Injeção (mm)	0,00	165

Para ambos os materiais estudados neste trabalho as variáveis fixas possuem os mesmos valores (Tabela 3).

**Tabela 3 - Níveis das variáveis fixas para PP e PE.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de molde (°C)	27
Limite de pressão de injeção (Mpa)	100

Como a temperatura do molde tem grande influência sobre as propriedades da peça final injetada, de maneira que seu aumento influencia no aumento da contração ou resfriamento irregular, foi mantido o valor mínimo indicado para os dois materiais estudados, 27°C.

## **5.6. Planejamento Composto Central**

A sequência de simulações deste trabalho teve os valores de variáveis preditoras determinados pelo planejamento composto central, que determina um número mínimo de corridas (experimentos) para que se tenha dados suficientes para uma análise estatística considerável.

Tanto para o Polipropileno como para o Polietileno utilizou-se o Planejamento Composto Central com análise de Regressão da Superfície de resposta para otimização da região de trabalho.

### 5.7. Características do Planejamento

Para este trabalho foi executado um Planejamento Composto Central (Tabela 4), composto por um planejamento fatorial completo de dois níveis, com dois fatores, 4 pontos de cubo, 5 pontos centrais e 4 pontos axiais (Tabela 5).

#### Fatorial com dois níveis: Fatorial completo:

Tabela 4 - Resumo do Planejamento Composto Central.

Fatores:	2	Réplicas:	1
Ensaio base:	13	Total de ensaios:	1 3
Blocos Base:	1	Total de blocos:	1

#### Tipos de Ponto

Tabela 5 - Resumo dos tipos de pontos.

Pontos do cubo:	4
Pontos centrais no cubo:	5
Pontos Axiais:	4
Pontos centrais em axial:	0

Onde:  $\alpha = 1,4142$

O valor de  $\alpha > 1$ , caracteriza o planejamento como rotacionável, o que é importante para o modelo de segunda ordem oferecer previsões com variância razoavelmente consistente e estável nos pontos de interesse a partir da superfície de resposta.

Este planejamento também é caracterizado por pontos centralizados na face, que são os valores altos e baixos extremos que os fatores (variáveis preditoras) podem ter, esses níveis (ou valores) são considerados seguros para uma execução. No caso da injeção plástica, para cada matéria prima sob determinadas condições há uma faixa de temperatura em que o processo deve acontecer para que ocorra o preenchimento completo do molde.

A Tabela 6 mostra o planejamento gerado em valores codificados para as variáveis preditoras.

**Tabela 6 - Planejamento composto Central com níveis codificadores para os fatores preditores. PI= Ponto de Injeção; TF = Temperatura de Fusão.**

<b>Experimento</b>	<b>PI</b>	<b>TF</b>
1	-0,70711	-0,70711
2	0,70711	-0,70711
3	-0,70711	0,70711
4	0,70711	0,70711
5	-1,00000	0,00000
6	1,00000	0,00000
7	0,00000	-1,00000
8	0,00000	1,00000
9	0,00000	0,00000
10	0,00000	0,00000
11	0,00000	0,00000
12	0,00000	0,00000
13	0,00000	0,00000

### 5.8. Valores para Simulações

A partir da tabela de valores codificados do planejamento composto central são calculados os valores de simulação de injeção plástica, baseando-se nos valores seguros para execução da injeção (Ponto de injeção e Temperatura de Fusão mínimos e máximos).

A Tabela 7 apresenta o planejamento (Temperatura de Fusão e Ponto de injeção) determinados pelo *software* Minitab para o Polipropileno Braskem América Inc / F006EC2:

**Tabela 7 - Planejamento Composto Central com 13 corridas, de face centrada e 4 pontos centrais e cubo para o Polipropileno. PI = Ponto de Injeção; TFUSÃO = Temperatura de Fusão**

<b>Ensaio</b>	<b>PI</b>	<b>TF</b>
1	24,163	243,903
2	140,836	243,903
3	24,163	253,096
4	140,836	253,096
5	0	248,5
6	165	248,5
7	82,5	242
8	82,5	255
9	82,5	248,5
10	82,5	248,5
11	82,5	248,5
12	82,5	248,5
13	82,5	248,5

A Tabela 8 apresenta os níveis para as variáveis preditoras (Temperatura de Fusão e Ponto de injeção) determinados pelo software Minitab para o polietileno PE-LLD Dow Chemical / Dowlex 2552 E:

**Tabela 8 - Planejamento Composto Central com 13 corridas, de face centrada e 4 pontos centrais de cubo para o Polietileno. PI = Ponto de Injeção; TFUSÃO = Temperatura de Fusão**

<b>Ensaio</b>	<b>PI</b>	<b>TF</b>
1	24,163	233,904
2	140,837	233,904
3	24,163	243,096
4	140,837	243,096
5	0,000	238,500
6	165,000	238,500
7	82,500	232,000
8	82,500	245,000
9	82,500	238,500
10	82,500	238,500
11	82,500	238,500
12	82,500	238,500
13	82,500	238,500

### 5.9. Análise Estatística

Esta etapa consiste na análise do modelo de Regressão da Superfície de Resposta a partir dos dados mais relevantes do Modelo Ajustado gerado pelo *software* estatístico minitab.

As variáveis de resposta das simulações de injeção analisadas estatisticamente são Temperatura Final e Pressão Final. O estudo aqui desenvolvido buscou compreender de que maneira e em que grau o posicionamento do ponto de injeção empreendido nas simulações interferiu nessas variáveis, e determinar quais os valores destas variáveis tornam o resultado ótimo.

Para isso foram gerados modelos de regressão ajustados para cada uma das variáveis de resposta, para ambos os materiais estudados, conforme opções abaixo:

- Temperatura Final (TFINAL) versus PI; TFUSÃO
- Pressão Final (PFINAL) versus PI; TFUSÃO

O termo versus apresentado nos tópicos acima pode ser lido também como “em função de”, as opções 1 e 2 indicam que as variáveis de resposta Temperatura Final e Pressão Final foram analisadas em função das variáveis preditoras Temperatura de Fusão e Ponto de Injeção.

Os modelos ajustados foram gerados utilizando a seleção Stepwise com o método de Eliminação por Backward, em que os preditores são incluídos de uma só vez na equação, e depois são retirados, um a um, até que se identifiquem os melhores preditores. Por razões não identificadas, este foi o único método que apresentou modelos aceitáveis para os dados analisados. Como o modelo estudado neste trabalho não possui variáveis categóricas, apenas variáveis contínuas, foi gerada apenas uma equação para cada variável resposta.

O resultado ótimo é aquele que se aproxima o máximo possível do que é desejado e descrito no projeto. Para uma injeção plástica um resultado ótimo está associado a menores taxas de defeitos, gastos de tempo, matéria e energia, além do alcance de boas propriedades para a peça moldada. Como o estudo feito neste trabalho analisa apenas duas variáveis de resposta, TFINAL e PFINAL, o resultado ótimo é alcançado quando propriedades relacionadas a estas respostas estão dentro do desejado.

Por fim, foi feita a otimização das variáveis preditoras Ponto de Injeção e Temperatura de Fusão para quatro casos considerando as variáveis de resposta Pressão Final e Temperatura Final.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta parte do trabalho são apresentados os resultados obtidos para as simulações realizadas, conforme planejamento composto central e parâmetros descritos anteriormente.

Os resultados coletados foram analisados através do *software* comercial Minitab, tendo como resultado o nível de influência das variáveis preditoras sobre as variáveis de resposta Temperatura final e Pressão Final e a descrição do seu comportamento.

Foi gerado um modelo para a superfície de resposta através de funções de regressão capazes de prever respostas para o processo. Através deste modelo gerou-se uma estimativa dos valores capazes de otimizar o resultado de injeção plástica baseado em quatro casos possíveis, sendo analisado seus prós e contras no que se refere a propriedades finais do produto moldado.

Temperatura Final e Pressão Final são as variáveis de resposta estudadas, e são resultados que podem indicar as condições do produto final quanto a existência de defeitos, a propriedades mecânicas, a degradação da matéria prima e até ao gasto energético do processo.

Esta sessão foi dividida pelo material estudado, sendo apresentado primeiro os resultados (Planejamento, simulações, regressão, otimização e simulação para valores otimizados) do Polipropileno e depois do Polietileno.

### 6.1. Polipropileno

Como descrito na seção de metodologia, o Planejamento composto central gerado para este trabalho conta com treze ensaios divididos em cinco níveis (valores), para as duas variáveis preditoras.

A Tabela 7 exibe os valores planejados para as variáveis preditoras a partir dos valores codificados gerados pelo *software* estatístico. Para cada ensaio descrito na tabela foi feita uma simulação e os dados resultantes de temperatura e pressão finais foram adicionados à Tabela 9.

**Tabela 9 - Resultados das simulações para o planejamento do Polipropileno; PFINAL e TFINAL são variáveis de resposta.**

<b>Ensaio</b>	<b>PI</b>	<b>TFUSÃO</b>	<b>PFINAL</b>	<b>TFINAL</b>
1	24,163	243,903	1,94	238,54
2	140,836	243,903	1,88	238,93
3	24,163	253,096	1,77	247,31
4	140,836	253,096	1,71	247,21
5	0	248,5	2,12	248,5
6	165	248,5	2,23	242,91
7	82,5	242	0,82	241,02
8	82,5	255	0,71	253,93
9	82,5	248,5	0,77	247,47
10	82,5	248,5	0,77	247,47
11	82,5	248,5	0,77	247,47
12	82,5	248,5	0,77	247,47
13	82,5	248,5	0,77	247,47

### **6.1.1. Análise de Regressão da Superfície de Resposta**

Os dados resultantes das simulações apresentados no tópico anterior foram utilizados para a análise de Regressão da Superfície de Resposta, que indicou dentre os diversos resultados o nível de adequação do modelo ajustado para os dados analisados, a contribuição de cada variável preditora e a equação de regressão para o modelo.

Foram testados outros modelos de regressão para estes dados, por fim, apenas o modelo aqui descrito apresentou adequação considerável para a análise, tendo os outros não apresentado resultados por motivos não identificados. Foi utilizada a técnica matemática de Eliminação Backward de termos e valor de  $\alpha=1$  para remoção, que elimina termos da equação de regressão com ordem definida pelo índice de importância, para chegar ao modelo de regressão.

## a) Temperatura Final (TFINAL) versus PI; TFUSÃO

- **Coefficientes Codificados**

Tabela 10 - Tabela de coeficientes codificados para o modelo ajustado da regressão da superfície e resposta para a variável de resposta TFINAL pro polipropileno.

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor -T	Valor-P	VIF
Constante	246,847	0,762	(245,124; 248,570)	324,08	0,000	
PI	-1,35	1,05	(-3,73; 1,04)	-1,28	0,234	1,00
TFUSÃO	6,24	1,05	(3,86; 8,63)	5,92	0,000	1,00
PI*PI	-3,33	1,59	(-6,91; 0,26)	-2,10	0,065	1,00

A tabela de coeficientes codificados apresenta respostas interessantes para determinar se um termo é um preditor significativo da resposta. À princípio, pode-se afirmar que o termo TFUSÃO da Tabela 10, referente à variável preditora Temperatura de Fusão, é significativo para a resposta Temperatura Final (TFINAL), pois apresenta o Valor-P<0,05, que é um valor padrão do *software* estatístico para interpretação de significância de um termo.

- **Sumário do Modelo**

Tabela 11 - Sumário do modelo de regressão ajustado para TFINAL do polipropileno.

R2	R2(aj)
82,02%	76,03%

R2 e R2 ajustados são as variáveis utilizadas para determinar a adequação do modelo para os dados analisados. Para a variável resposta TFINAL, o modelo apresentou R2 igual a 82,02%, o que mostra que apenas 17,98% da variação de resposta não pode ser explicada por este modelo.

R2 ajustado é a porcentagem de respostas explicadas pelo modelo baseada no número de preditores, é calculado como 1 - (quadrado médio do erro / quadrado médio total), os preditores se ajustaram 76,03% ao modelo. O erro

estimado do modelo pode ser devido a variáveis ou interações não considerados na análise.

Apesar do grande controle do experimentador ao adquirir dados reais, podem aparecer erros grosseiros ou valores equivocados, chamados outliers, que é uma informação que é de alguma forma separada do resto dos dados, podendo levar à especificação errada do modelo, estimação enviesada e parâmetros e resultados incorretos (BARROS, 2013).

- **Análise de Variância**

**Tabela 12 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de regressão ajustado para a variável de resposta TFINAL do polipropileno**

Fonte	G L	Contribuição
Modelo	3	82,02%
Linear	2	73,23%
PI	1	3,26%
TFUSÃO	1	69,97%
Quadrado	1	8,80%
PI*PI	1	8,80%
Erro	9	17,98%
Falta de ajuste	5	17,98%
Erro puro	4	0,00%
Total	12	100,00%

Para a variável de resposta Temperatura Final, analisando a coluna de contribuição na tabela de Análise de Variância (Tabela 12), pode-se verificar que, com 69,29% de contribuição, a variável preditora TFUSÃO é a que mais gera variações na variável de resposta. Comparando com o termo PI (ponto de injeção) linear, que possui apenas de 3,26% de contribuição sobre a variável, Temperatura de fusão se estabelece como a preditora de maior influência sobre a Temperatura Final.

Analisando de forma geral, pode-se dizer que quanto maior a Temperatura de Fusão utilizada no processo de injeção plástica do Polipropileno, maior será a TFINAL alcançada, portanto, maiores as chances de haver degradação térmica da matéria prima, além de aumentar consequentemente o

gasto energético. O que também é indicado pelo sinal positivo que o termo recebe na equação de regressão

Os problemas que podem ser identificados com o aumento da TFINAL na injeção plástica do Polipropileno são degradação da matéria prima e diminuição em determinadas propriedades mecânicas, aumento do tempo para resfriamento e retirada do molde, o que aumenta o tempo total do processo de produção da peça.

- **Equação de Regressão em Unidades Não codificadas**

$$TFINAL = 6,2 + 0,0644 PI + 0,960 TFUSÃO - 0,000489 PI*PI \quad \text{Equação 5}$$

A Equação 5 apresenta a equação reduzida para o modelo de regressão gerado. Por possuir mais de um preditor, esse modelo é denominado como regressão linear múltipla. O sinal de cada coeficiente da equação indica a direção da relação entre os preditores e a variável resposta. Os coeficientes representam a mudança média na resposta para uma unidade de mudança no preditor mantendo constantes os outros preditores no modelo. A equação prediz novas observações com valores especificados dos preditores.

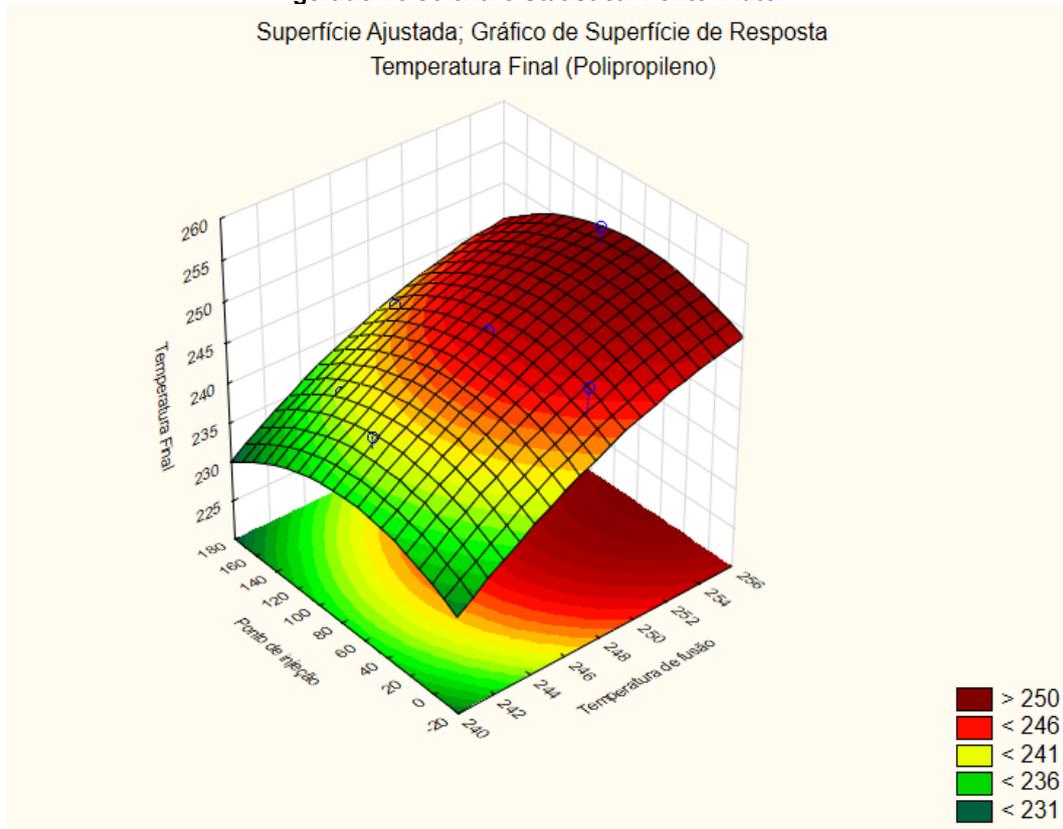
A equação de regressão para a variável de resposta TFINAL reitera a influência significativa da variável preditora TFUSÃO, cujo coeficiente apresenta sinal positivo, que indica aumento da resposta com o aumento da preditora, e valor nominal maior que os outros termos, significando maior influência sobre TFINAL.

A grande influência da temperatura de fusão sobre a temperatura final indica a necessidade de observação deste parâmetro quando a peça moldada possuir requisitos de propriedades mecânicas e de tempo de processo como prioridade.

O gráfico de Pareto ( APÊNDICE A - Figura 13) apresenta a relação entre a resposta e os termos no modelo, indicando em ordem decrescente o nível de influência de cada termo sobre a resposta. Para a resposta TFINAL o modelo gerado indica maior influência do termo linear (B) da preditora TFUSÃO, seguido

do termo quadrático (AA) do Ponto de Injeção, que como observado na equação de regressão tem sinal negativo.

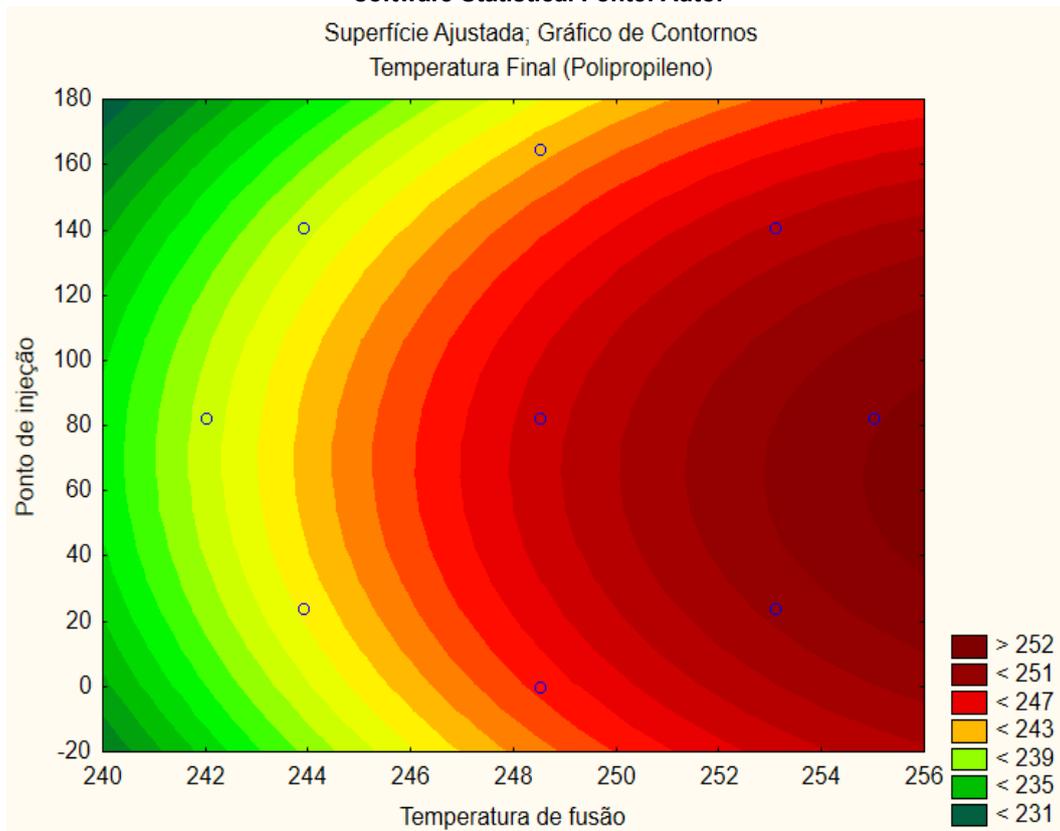
**Figura 14 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta TFINAL para o Polipropileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor**



A superfície de resposta é curva porque o modelo possui termos quadráticos que são estatisticamente significativos. Para a TFINAL o termo quadrático relevante é o PI quadrático conforme o gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a variável de resposta PFINAL do polipropileno (APÊNDICE A - Figura 22). Os maiores valores para TFINAL estão no canto superior direito do Figura 14, o que corresponde aos maiores valores de TFUSÃO, e o ponto máximo para TFINAL encontra-se no ponto médio da variável Ponto de Injeção.

O gráfico da Figura 14 mostra que caso o projeto considere as propriedades mecânicas como mais relevantes, deve-se evitar o posicionamento do ponto de injeção na região central, pois está associado a altas temperaturas de fusão. Combinação que gera os maiores valores de temperatura final e consequentemente maiores chances de degradação da matéria-prima.

**Figura 15 - Gráfico de contornos da variável de resposta TFINAL para o Polipropileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor**



A Figura 15 apresenta o gráfico de contornos, sendo a projeção da Superfície de Resposta, mostra a relação entre as definições de TFUSÃO e PI utilizadas na injeção plástica do Polipropileno e a respostas TFINAL da peça após o processo. As regiões em vermelho mais escuro indicam os maiores valores de TFINAL, e se concentram nos valores médios de PI e máximos de TFUSÃO, já as combinações de valores extremos (mínimos e máximos) de PI com valores mínimos de TFUSÃO indicam os valores mínimos para TFINAL, em verde mais escuro.

## b) Pressão Final (PFINAL) versus PI; TFUSÃO

- **Coefficientes Codificados**

**Tabela 13 - Tabela de coeficientes codificados para a variável de resposta Pressão Final (PFINAL)**

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor -T	Valor -P	VIF
Constante	0,8300	0,0674	(0,6798; 0,9802)	12,32	0,000	
PI	0,0063	0,0933	(-0,2016; 0,2142)	0,07	0,948	1,00
PI*PI	1,560	0,140	(1,247; 1,873)	11,12	0,000	1,00

Analisando a coluna Valor-P da Tabela 13, verifica-se que apenas a variável preditora PI apresenta influência sobre a resposta de PFINAL, e que o termo quadrático apresenta maior efeito sobre a resposta. Esse comportamento também pode ser visualizado no Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável de resposta PFINAL (APÊNDICE A - Figura 23). Como o termo quadrático é o mais significativo do modelo, conclui-se que a superfície de resposta contém curvatura.

- **Sumário do Modelo**

**Tabela 13 - Sumário do modelo de regressão ajustado para PFINAL do polipropileno**

R2	R2(aj)
92,52 %	91,02 %

Para a variável de resposta PFINAL o modelo gerado foi muito satisfatório, explicando 92,52% de sua variação, e o R2 ajustado para as variáveis do modelo foi de 91,02% o que é bem satisfatório, pois pode significar que os erros, interações e variáveis não consideradas no modelo representam menos de 10%.

- **Análise de Variância**

**Tabela 14 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de regressão ajustado para a variável de resposta PFINAL do polipropileno**

Fonte	G L	Contribuição
Modelo	2	92,52%
Linear	1	0,00%
PI	1	0,00%
Quadrático	1	92,51%
PI*PI	1	92,51%
Erro	10	7,48%
Falta de ajuste	6	7,48%
Erro puro	4	0,00%
Total	12	100,00%

Com a maior parte da influência sobre a variável de resposta PFINAL, o termo quadrático PI\*PI possui valor-p igual a zero (Tabela 13), o que indica que

a hipótese nula é falsa, logo o ponto de injeção tem influência sobre a resposta, e comparado aos outros termos, a maior significância. O gráfico de Pareto para os efeitos padronizados para a variável de resposta PFINAL do polipropileno (APÊNDICE A - Figura 23) reitera a significativa influência do termo quadrático de PI sobre a resposta PFINAL.

- **Equação de Regressão em Unidades Não codificadas**

$$PFINAL = 2,384 - 0,03774 PI + 0,000229 PI*PI$$

Equação 6

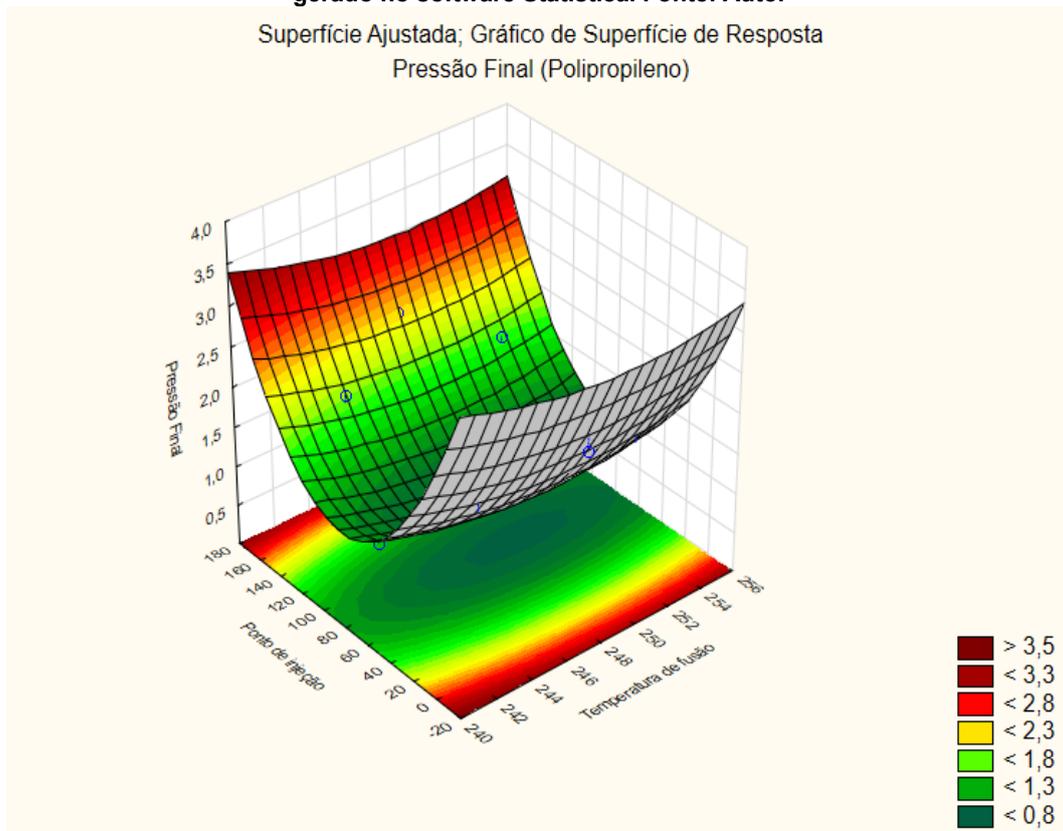
Para PFINAL o modelo ajustado verifica através da equação de regressão do modelo reduzido ( $PFINAL = 2,384 - 0,03774 PI + 0,000229 PI*PI$

Equação 6) que o termo quadrático do ponto de injeção apresenta maior influência que o termo linear e sentido positivo no crescimento do resultado da equação. A variável independente TFUSÃO não apresenta influência sobre a pressão final para o modelo ajustado.

Na Tabela 9 pode-se verificar que os resultados de Pressão Final para os pontos de injeção no centro da peça possuem os menores valores. Isso porque quando posicionado próximo ao centro da peça, PI gera dois fluxos de sentidos contrários, reduzindo o comprimento de fluxo e os requisitos de pressão de injeção, o que conseqüentemente gera uma menor pressão ao final do preenchimento.

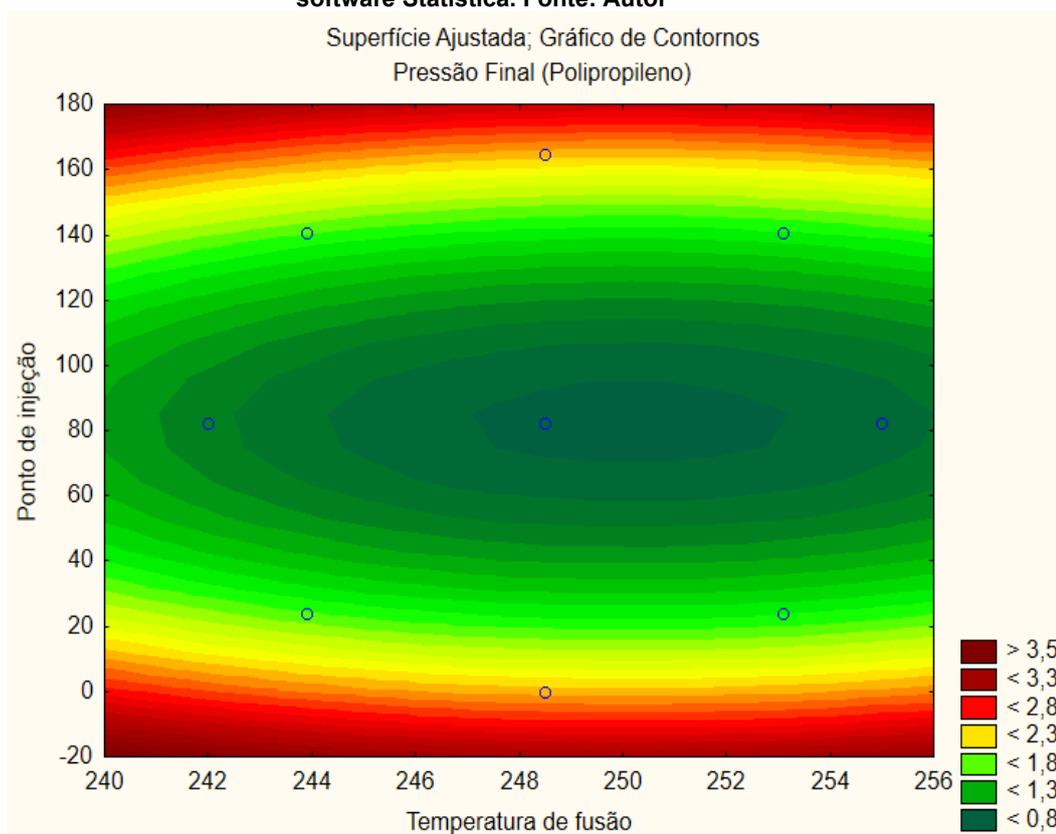
A variável de resposta PFINAL é uma indicação muito boa da regularidade com que a cavidade foi preenchida. Para o caso simulado neste trabalho o preenchimento da peça em todas as simulações foi de 100% do molde, no entanto, os resultados indicam que para pontos de injeção nas extremidades da peça PFINAL possui os maiores valores.

Figura 16 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta PFINAL para o Polipropileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor



Os maiores valores para Pressão Final estão nas extremidades da curvatura (Figura 16) que coincidem com os valores máximo e mínimo do ponto de injeção, correspondentes às extremidades da peça moldada. Os pontos de mínimo para PFINAL concentram-se nos valores médios do ponto de injeção, não apresentando variação significativa com a variação de TFUSÃO.

Figura 17 - Gráfico de Contornos da variável de resposta PFINAL para o Polipropileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor



O gráfico de contornos (Figura 17) mostra a relação entre as definições de TFUSÃO e PI utilizados na injeção plástica do Polipropileno e a PFINAL da peça ao final do processo. As regiões em vermelho mais escuro indicam os maiores valores PFINAL, e parecem se concentrar nos valores máximos tanto de PI como de TFUSÃO, já para os pontos médios de PI combinados com todos os valores de TFUSÃO indicam os valores mínimos para TFINAL, em verde mais escuro.

Os valores mínimos de PFINAL estarem concentrados nos pontos médios de PI são explicados pela divisão de fluxo e diminuição da taxa de injeção quando PI está nesta posição, assim os comprimentos de fluxo e os requisitos de pressão de injeção são reduzidos.

### 6.1.2. Otimização da Resposta

A otimização das respostas foi feita através de uma função do *software* estatístico, que permite encontrar valores para as variáveis preditoras que resultem em valores específicos ou aproximados para as variáveis de resposta.

Esta função permite, então, maximizar, minimizar ou especificar o valor das variáveis de resposta que o usuário deseja alcançar.

Foram consideradas quatro casos de otimização para as variáveis de resposta PFINAL e TFINAL (PFINAL; TFINAL):

Caso 1: (Minimizar, Minimizar);

Caso 2: (Maximizar; Maximizar);

Caso 3: (Maximizar; Minimizar);

Caso 4: (Minimizar; Maximizar).

Para as simulações realizadas foram considerados valores mínimos das variáveis preditoras que proporcionem o total preenchimento da cavidade do molde, portanto, para os resultados de otimização também haverá o preenchimento de 100% da peça.

#### **Caso 1: (Minimizar; Minimizar)**

**Tabela 15 - Dados de otimização para o caso 1 (Minimizar, Minimizar) do polipropileno**

<b>Parâmetros</b>				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Mínimo		0,71	2,23
TFINAL	Mínimo		238,54	253,93
<b>Solução</b>				
PI		TFUSÃO		
86,6667		242		
<b>Predição de Respostas</b>				
PFINAL		TFINAL		
0,8343		240,53		

A Tabela 15 e o gráfico de desejabilidade (APÊNDICE B - Figura 24) mostram a solução de otimização para o caso 1 do polipropileno, em que as variáveis de resposta devem ser mínimas. O objetivo, então, é PFINAL igual a 0,71 Mpa e TFINAL igual 238,54 °C, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 86,6667 e TFUSÃO = 242) é de PFINAL igual 0,8343 e TFINAL igual a 240,53. A pequena diferença entre valores alvo e valores de predição se dá pelo erro ou ajuste calculado pelo próprio *software* estatístico e limitações do modelo.

Logo, para este caso, PFINAL mínima pode aumentar a contração do material fundido injetado, gerando defeitos como rechupe, e Temperatura Final com valores mínimos minimizam a possibilidade de degradação da matéria prima e diminuem a contração.

### Caso 2: (Maximizar; Maximizar)

Tabela 16 - Dados de otimização para o caso (Maximizar, Maximizar) do polipropileno

Parâmetros				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Máximo	0,71	2,23	
TFINAL	Máximo	238,54	253,93	
Solução				
PI		TFUSÃO		
3,3333		255		
Predição de Respostas				
PFINAL		TFINAL		
2,260		251,32		

A Tabela 16 e o gráfico de desejabilidade (APÊNDICE - Figura 25) mostram a solução de otimização para o caso 2, em que as variáveis de resposta devem ser máximas. O objetivo, então, é PFINAL igual a 2,23 Mpa e TFINAL igual 253,93, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 3,33 e TFUSÃO = 255) é de PFINAL igual 2,260 e TFINAL igual a 251,32.

### Caso 3: (Maximizar; Minimizar)

Tabela 17 - Dados de otimização para o caso (Máximizar, Minimizar) do polipropileno

Parâmetros				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Máximo	0,71	2,23	
TFINAL	Mínimo		238,54	253,93
Solução				
PI		TFUSÃO		
165		242		
Predição de Respostas				
PFINAL		TFINAL		
2,396		235,93		

A Tabela 17 e o gráfico de desejabilidade (APÊNDICE - Figura 26) mostram a solução de otimização para o caso 3, em que PFINAL deve ser máximo e TFINAL mínimo. O objetivo, então, é PFINAL igual a 2,23 Mpa e

TFINAL igual 238,54, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 165 e TFUSÃO = 242) é de PFINAL igual 2,396 e TFINAL igual a 235,93.

#### Caso 4: (Minimizar; Maximizar)

Tabela 18 - Dados de otimização para o caso (Minimizar, Maximizar) do polipropileno

Parâmetros				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Mínimo		0,71	2,23
TFINAL	Máximo	238,54	253,93	
Solução				
PI		TFUSÃO		
80		255		
Predição de Respostas				
PFINAL		TFINAL		
0,8312		253,13		

A Tabela 18 e o gráfico de desejabilidade (APÊNDICE - Figura 27) mostram a solução de otimização para o caso 4, em que PFINAL deve ser mínimo e TFINAL máximo. O objetivo, então, é PFINAL igual a 0,71 Mpa e TFINAL igual 253,93, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 80 e TFUSÃO = 255) é de PFINAL igual 0,8312 e TFINAL igual a 253,13.

#### 6.1.3. Simulação para os Valores Otimizados

Para cada caso de otimização das respostas PFINAL e TFINAL o *software* Minitab® encontra valores para as variáveis preditoras TFUSÃO e PI a fim de que os processos de injeção plástica feitos com estas alcancem os valores ótimos de PFINAL e TFINAL.

Os valores de PI encontrados pelo programa de estatística e os utilizados nas simulações podem dezoar, pois o *software* Solidworks Plastics® para simular uma injeção plástica faz a discretização da região de trabalho, que é a criação de uma malha para a peça, o *software* gera uma mistura de elementos sólidos (triângulos, quadrados, etc.) que dividem toda a peça. Dessa maneira os pontos que são passíveis de serem utilizados como ponto de injeção são limitados aos nós, que por são os pontos que ligam esses elementos sólidos subdividindo a peça.

Os resultados resumidos para os valores de variáveis preditoras TFUSÃO E PI para otimização das respostas PFINAL E TFINAL do polipropileno são exibidas no APÊNDICE C.

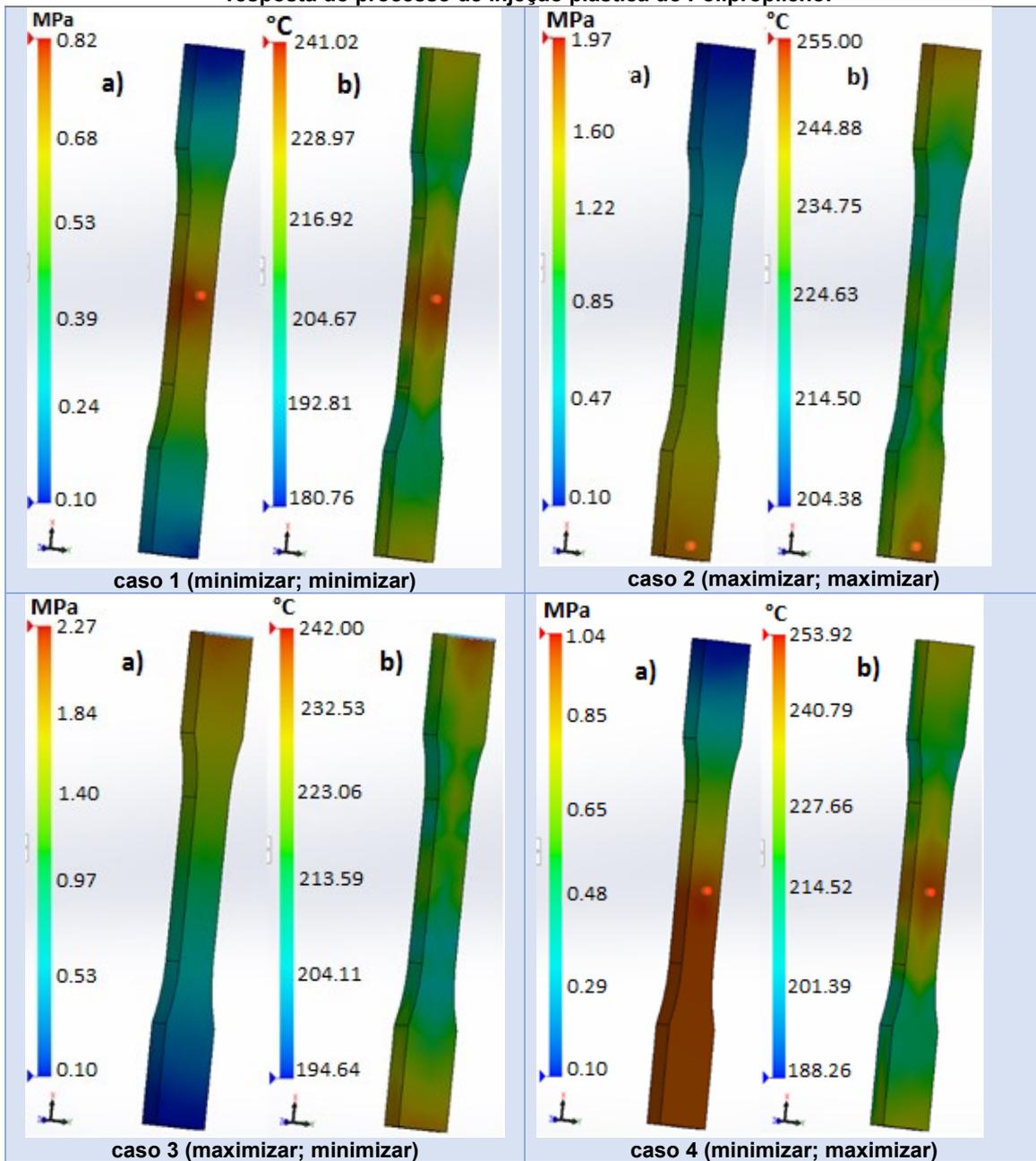
Foram feitas novas simulações utilizando os valores de TFUSÃO e PI encontrados para os casos de otimização descritos no APÊNDICE C. O software de simulação de injeção plástica gerou um perfil de distribuição de PFINAL e TFINAL na peça moldada para cada um dos quatro casos. A Tabela 19 apresenta estes perfis, sendo a) Perfil de PFINAL e b) Perfil de TFINAL. Os valores para as variáveis de resposta são representados por cores na linha vertical correspondentes no desenho, indo de valores mínimos na cor azul, até valores máximos na cor vermelha.

O caso em que a otimização gera perfis com melhor distribuição de Temperatura Final e Pressão Final é apresentado caso 1 (minimizar; minimizar) na Tabela 19. O caso 4 (mínimizar; maximizar) na Tabela 19 apresentou o perfil com pior distribuição de PFINAL, o que indica possível perda de propriedades mecânicas devido ao acúmulo de tensões nas regiões com maior concentração de pressão.

Durante o processo a alta tensão de cisalhamento do molde pode gerar distribuições de tensões não uniformes, o que causa contração da peça de forma não uniforme, gerando empenamento da peça moldada. A tensão de cisalhamento pode ser diminuída aumentando-se a TFUSÃO e a temperatura do molde, o tempo de injeção, diminuindo a pressão de recalque ou aumentando a espessura da peça.

Considerando os casos estudados neste trabalho, o ideal é aumentar a temperatura do molde, pois a massa polimérica pode sofrer degradação térmica caso seja aumentada a TFUSÃO; o tempo de injeção e espessura da peça aumentam os gastos com tempo de máquina e de mão de obra e com matéria-prima, além de auterarem parâmetros de projeto .

Tabela 19 - Perfil de a) Pressão Final e b) Temperatura Final para os casos de otimização de resposta do processo de injeção plástica do Polipropileno.



## 6.2. Polietileno

A Tabela 8 exibe os valores planejados para as variáveis preditoras a partir dos valores codificados gerados pelo programa estatístico para o polietileno. Para cada ensaio descrito na tabela foi feita uma simulação e os dados resultantes de TFINAL e PFINAL foram adicionados à Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados das simulações para o planejamento do Polietileno; Pressão Final e Temperatura Final são variáveis de resposta.

Ensaio	PI	TFUSÃO	PFINAL	TFINAL
1	24,163	233,904	0,61	230,50
2	140,837	233,904	0,58	230,78
3	24,163	243,096	0,56	239,54
4	140,837	243,096	0,54	239,78
5	0,000	238,500	0,69	238,50
6	165,000	238,500	0,69	238,50
7	82,500	232,000	0,28	231,02
8	82,500	245,000	0,25	243,92
9	82,500	238,500	0,27	237,47
10	82,500	238,500	0,27	237,47
11	82,500	238,500	0,27	237,47
12	82,500	238,500	0,27	237,47
13	82,500	238,500	0,27	237,47

### 6.2.1. Análise de Regressão da Superfície de Resposta

#### a) Temperatura Final (TFINAL) versus PI; TF

- Coeficientes Codificados

Tabela 21 - Tabela de coeficientes codificados para o modelo ajustado da regressão da superfície de resposta para a variável de resposta TFINAL pro Polietileno

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	236,915	0,371	(236,097; 237,732)	638,06	0,000	
TF	4,535	0,473	(3,494; 5,577)	9,58	0,000	1,00

Valor-p para o termo TF (Temperatura de Fusão) indica que a variável preditora de Temperatura de Fusão possui influência significativa sobre TFINAL.

- **Sumário do Modelo**

Tabela 22 - Sumário do modelo de regressão ajustado para TFINAL do Polietileno

R2	R2(aj)
89,30 %	88,33 %

O modelo ajustado para a variável TFINAL consegue explicar 89,3% das mudanças na resposta, o que é razoável.

- **Análise de Variância**

Tabela 23 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de regressão ajustado para a variável de resposta TFINAL do polietileno

Fonte	G L	Contribuição
Modelo	1	89,30%
Linear	1	89,30%
TF	1	89,30%
Erro	11	10,70%
Falta de ajuste	7	10,70%
Erro puro	4	0,00%
Total	12	100,00%

Pela análise de variância na Tabela 23 pode-se concluir que apenas o termo linear de Temperatura de Fusão possui influência sobre a resposta TFINAL, contribuindo com 89,3% de influência.

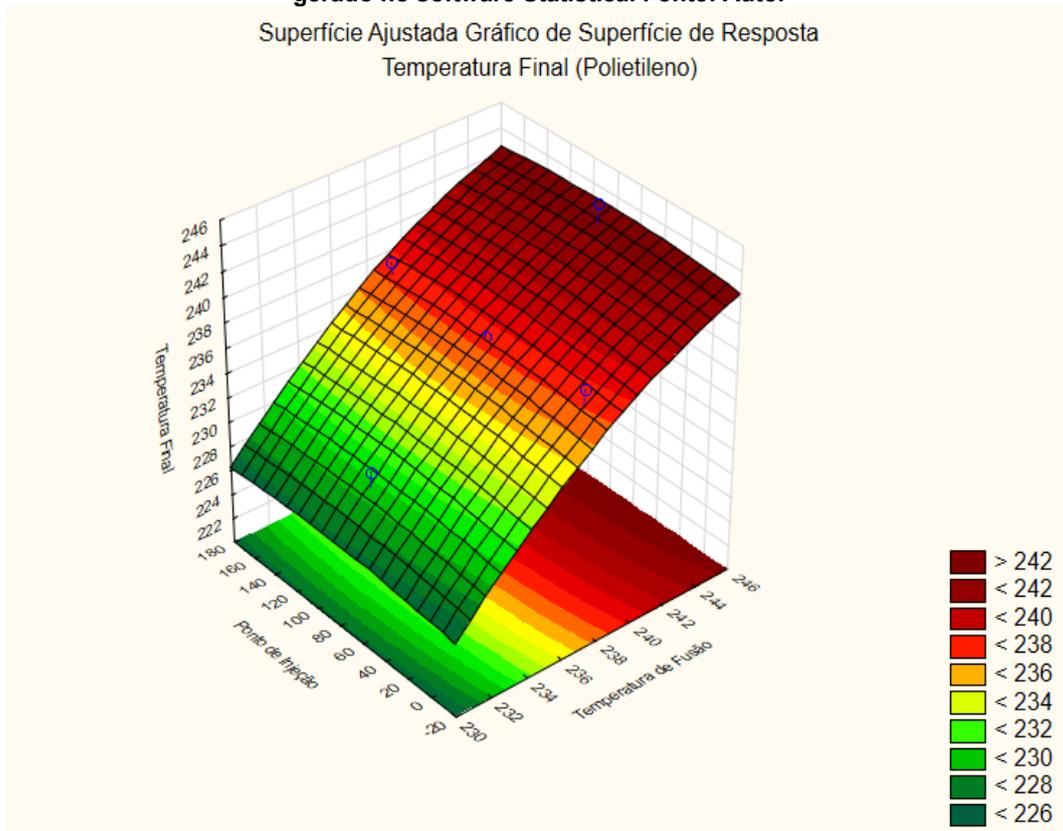
- **Equação de Regressão em Unidades Não codificadas**

$$\text{TFINAL} = 1,6 + 0,987 \text{ TF} \quad \text{Equação 7}$$

A equação de regressão reduzida para o modelo gerado (TFINAL = 1,6 + 0,987 TF Equação 7) mostra a ação positiva do termo TF sobre a resposta TFINAL.

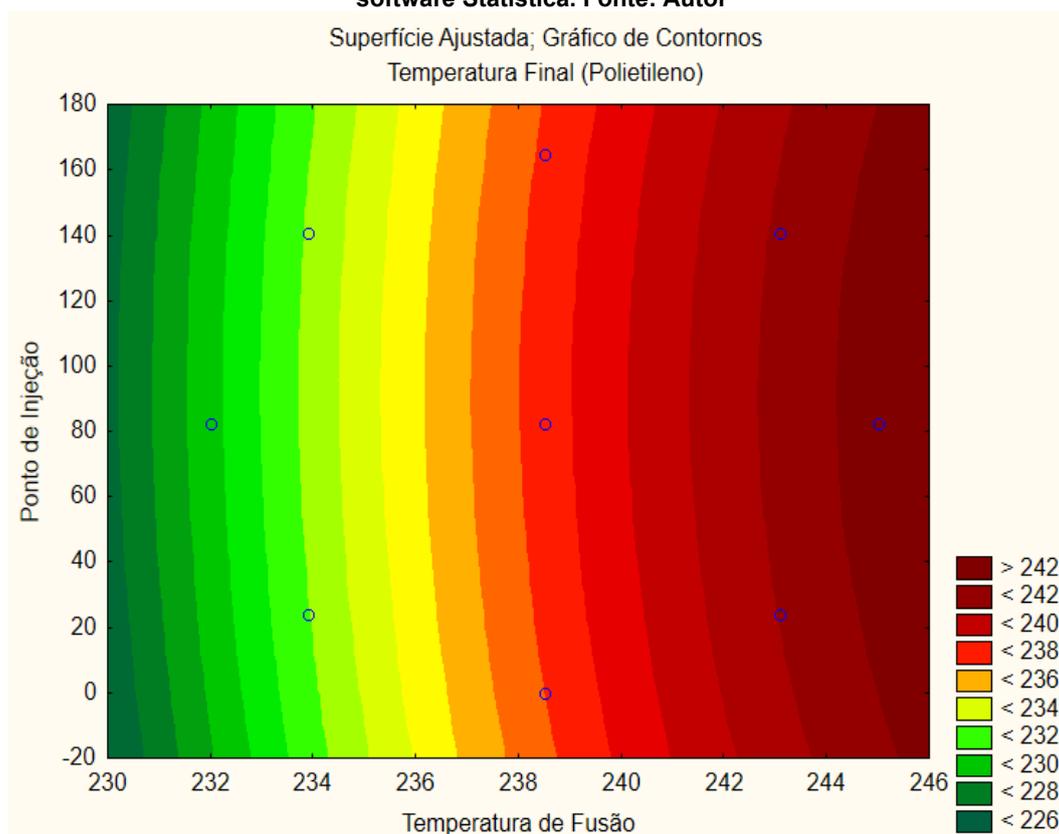
O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável TFINAL do Polietileno (APÊNDICE D – Figura 28) indica a influência apenas do termo linear de TF (Temperatura de Fusão) sobre a resposta TFINAL.

Figura 18 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta TFINAL Para o Polietileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor



O gráfico de superfícies de respostas (Figura 18) mostra a relação das variáveis preditoras com a variável de resposta TFINAL. Os valores mais altos para a resposta encontram-se no canto superior direito, na cor vermelho escuro e coincidem com os valores mais altos da temperatura de fusão, não variando com o ponto de injeção.

**Figura 19 - Gráfico de Contornos da variável de resposta TFINAL para o Polietileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor**



O gráfico de contornos (Figura 19) reitera que a resposta TFINAL varia basicamente com a variação de TFUSÃO, mas diferente do polipropileno apresenta mudanças menos bruscas evidenciadas pela pequena curvatura das linhas de contorno.

### b) Pressão Final (PFINAL) versus PI; TF

- **Coeficientes Codificados**

**Tabela 24 - Tabela de coeficientes codificados para o modelo ajustado da regressão da superfície de resposta para a variável de resposta TFINAL pro Polietileno**

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	0,2848	0,0177	(0,2454; 0,3242)	16,10	0,000	
PI	-0,0063	0,0173	(-0,0448; 0,0323)	-0,36	0,726	1,00
PI*PI	0,2310	0,0184	(0,1899; 0,2720)	12,54	0,000	1,00

O valor-p para o termo quadrático de PI (Tabela 24) indica que a variável preditora PI tem influência sobre a respostas, o que é reiterado na Tabela 26, que lhe determina a Contribuição de 93,95% sobre a resposta.

- **Sumário do Modelo**

Tabela 25 - Sumário do modelo de regressão

R2	R2(aj)
94,03 %	92,83 %

Para este modelo os indicadores R2 e R2 ajustado indicam que o modelo gerado é eficaz em descrever bem o comportamento dos dados injeção para a variável PFINAL do polietileno.

- **Análise de Variância**

Tabela 26 - Tabela dos resultados da análise de variância do modelo de regressão ajustado para a variável de resposta PFINAL do polietileno

Fonte	G L	Contribuição
Modelo	2	94,03%
Linear	1	0,08%
PI	1	0,08%
Quadrático	1	93,95%
PI*PI	1	93,95%
Erro	10	5,97%
Falta de ajuste	6	5,97%
Erro puro	4	0,00%
Total	12	100,00%

PFINAL verifica-se através da coluna Contribuição da Tabela 26 que o termo quadrático do ponto de injeção possui maior influência nos resultados, sendo que temperatura de fusão parece não influenciar significativamente nos resultados.

- **Equação de Regressão em Unidades Não codificadas**

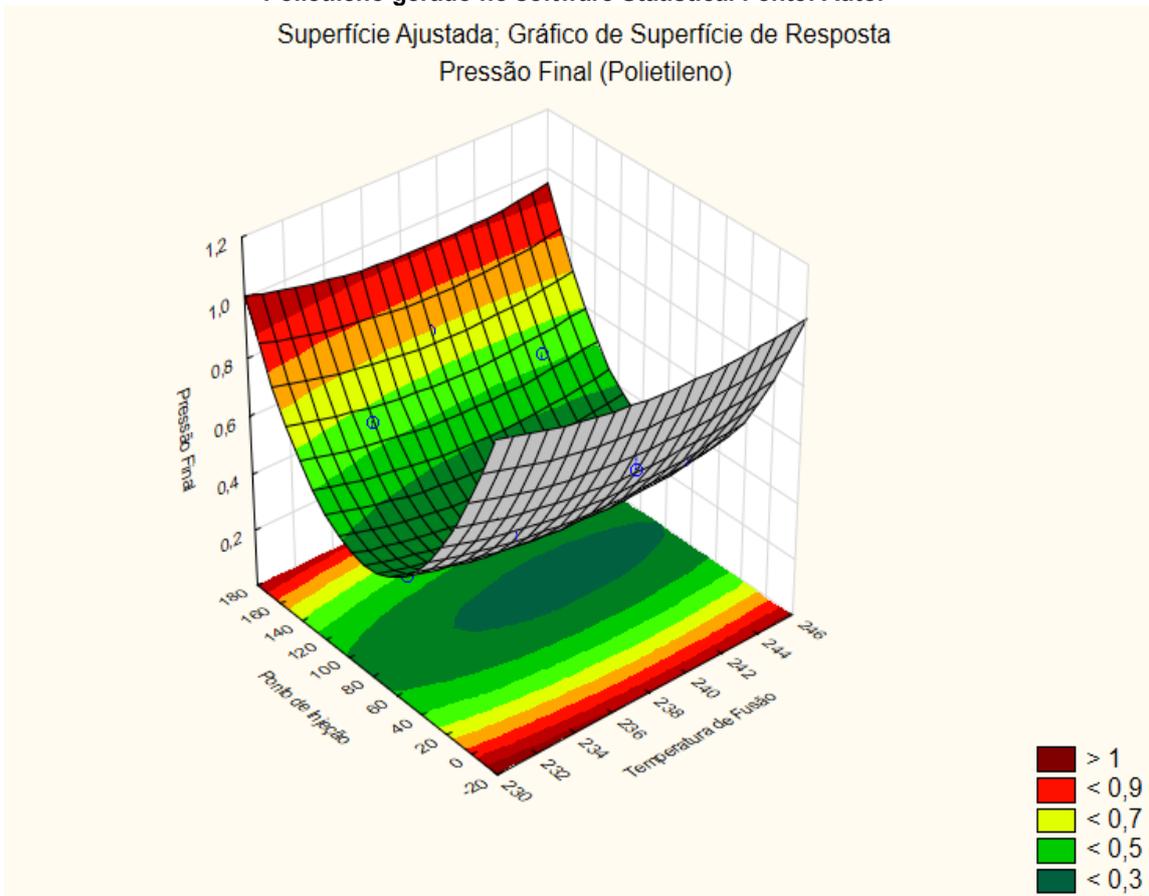
$$PFINAL = 0,7556 - 0,011306 PI + 0,000068 PI*PI$$

Equação 8

A equação de regressão reduzida que descreve o modelo gerado ( $PFINAL = 0,7556 - 0,011306 PI + 0,000068 PI*PI$  Equação 8) reitera que o fator de maior influência no resultado é o termo quadrático de PI.

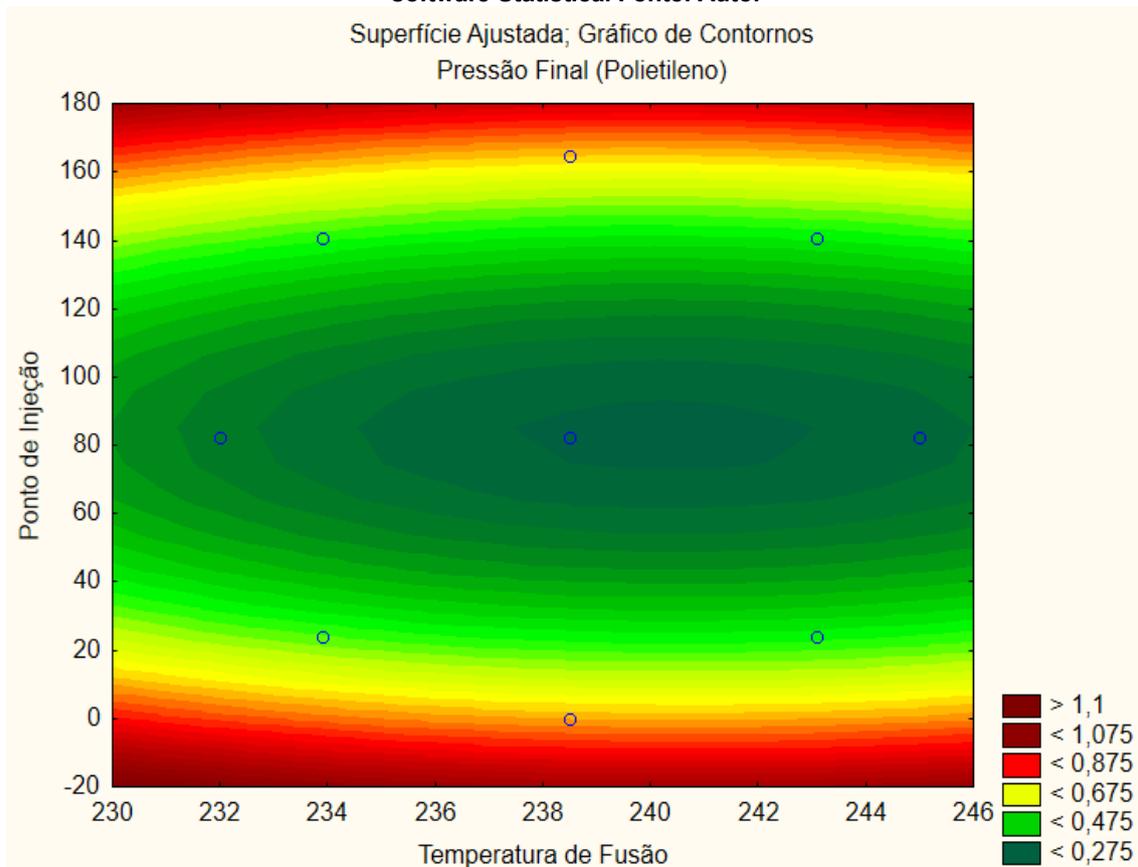
O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável PFINAL do Polietileno (APÊNDICE D - Figura 29) indica a influência do termo quadrático (AA) e linear (A) de PI (ponto de injeção) sobre a resposta PFINAL.

**Figura 20 - Gráfico de superfície de resposta da variável de resposta Pressão Final para o Polietileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor**



O gráfico de superfície de resposta para PFINAL (Figura 20) mostra uma faixa de valores de pressão menor que o primeiro material, com 0,7Mpa do polietileno contra 2,7Mpa do polipropileno (valores arredondados) de diferença entre valores mínimo e máximo. Os maiores valores encontram-se nas extremidades e da curva e coincidem com os valores extremos do ponto de injeção e não são muito influenciados pela TFUSÃO.

**Figura 21 - Gráfico de Contornos da variável de resposta PFINAL para o Polietileno gerado no software Statistica. Fonte: Autor**



O gráfico da Figura 21 de contornos mostra a relação entre as definições de Temperatura de fusão e Ponto de injeção utilizadas na injeção plástica do Polietileno e a Pressão Final da peça ao final do processo. As regiões em vermelho mais escuro indicam os maiores valores PFINAL, e se concentram nos valores máximos e mínimos de PI, já os pontos médios de PI concentram os valores mínimos para PFINAL, em verde mais escuro, o que pode ser explicado pela divisão da taxa de injeção, assim os comprimentos de fluxo e os requisitos de pressão de injeção são reduzidos.

### 6.2.2. Otimização da Resposta

A otimização das respostas foi feita através de uma função do programa estatístico, que permite encontrar valores para as variáveis preditoras, que permitam ter como resultado valores específicos ou aproximados para as variáveis de resposta. Ele permite, então, maximizar, minimizar ou especificar o valor das variáveis de resposta.

Foram consideradas quatro condições para as variáveis de resposta PFINAL e TFINAL (PFINAL; TFINAL):

Caso 1: (Minimizar, Minimizar);

Caso 2: (Maximizar; Maximizar);

Caso 3: (Maximizar; Minimizar);

Caso 4: (Minimizar; Maximizar).

### Caso 1: (Minimizar; Minimizar)

Tabela 27 - Dados de otimização para o caso (Mínimo, Mínimo) do polietileno

Parâmetros				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Mínimo		0,25	0,69
TFINAL	Mínimo		230,50	243,92
Solução				
PI		TFUSÃO		
83,3333		232		
Predição de Respostas				
PFINAL		TFINAL		
0,2847		230,501		

A Tabela 27 e o gráfico de desejabilidade (APÊNDICE E – Figura 30) mostram a solução de otimização para o caso 1, em que as variáveis de resposta devem ser mínimas. O objetivo, então, é PFINAL igual a 0,25 Mpa e TFINAL igual 230,50, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 83,33 e TFUSÃO = 232) é de PFINAL igual 0,2847 e TFINAL igual a 230,501. A pequena diferença entre valores alvo e valores de predição se dá pelo erro ou ajuste calculado pelo próprio *software* estatístico.

### Caso 2: (Maximizar; Maximizar)

Tabela 28 - Dados de otimização para o caso (Máximizaz, Máximizaz) do polietileno

Parâmetros				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Máximo	0,25	0,69	
TFINAL	Máximo	230,50	243,92	
Solução				
PI		TFUSÃO		
165		245		
Predição de Respostas				
PFINAL		TFINAL		
0,7379		243,329		

A Tabela 28 e o gráfico (APÊNDICE E - Figura 31) mostram a solução de otimização para o caso 2, em que as variáveis de resposta devem ser máximas. O objetivo, então, é PFINAL igual a 0,69 Mpa e TFINAL igual 243,92, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 165 e TFUSÃO = 245) é de PFINAL igual 0,7379 e TFINAL igual a 243,329.

A maximização da temperatura final pode gerar problemas dimensionais na peça injetada, pois aumenta a contração sofrida pela massa polimérica durante o processo de resfriamento.

### Caso 3: (Maximizar; Minimizar)

Tabela 29 - Dados de otimização para o caso (Máximo, Mínimo) do polietileno

Parâmetros				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Máximo	0,25	0,69	
TFINAL	Mínimo		230,5	243,92
Solução				
PI		TFUSÃO		
165		232		
Predição de Respostas				
PFINAL		TFINAL		
0,7379		230,501		

A Tabela 29 e o gráfico (APÊNDICE E - Figura 32) mostram a solução de otimização para o caso 3, em que PFINAL deve ser máximo e TFINAL deve ser mínimo. O objetivo, então, é PFINAL igual a 0,69 Mpa e TFINAL igual 230,5, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 165 e TFUSÃO = 232) é de PFINAL igual 0,7379 e TFINAL igual a 230,501.

### Caso 4: (Minimizar; Maximizar)

Tabela 30 - Dados de otimização para o caso (Mínimo, Máximo) do polietileno

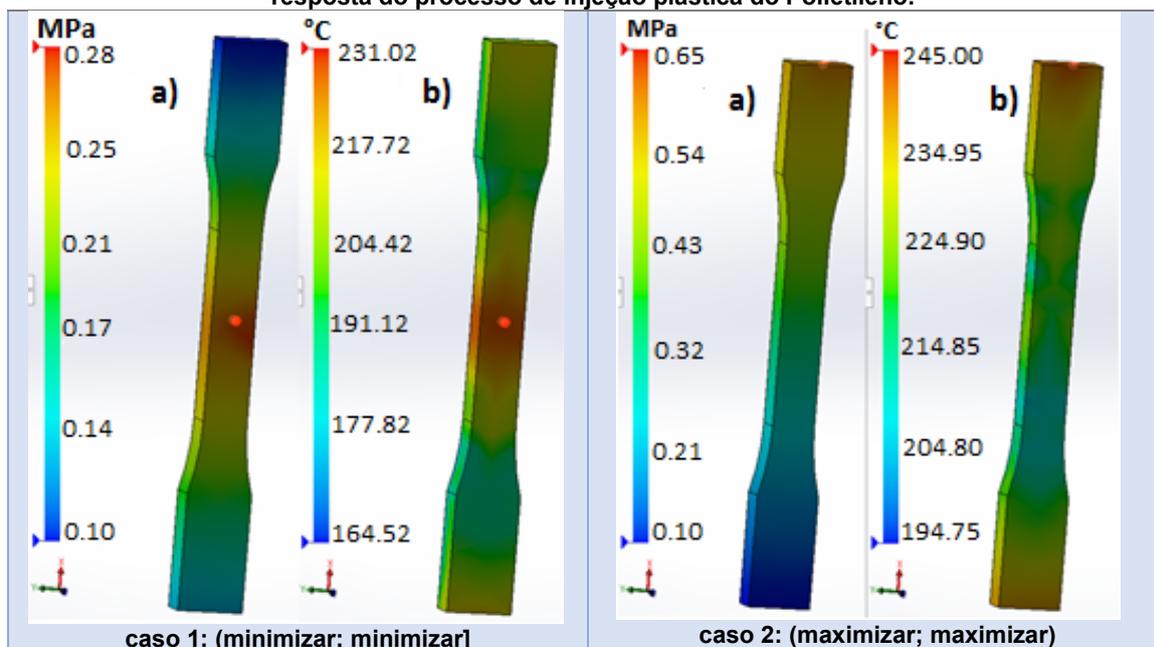
Parâmetros				
Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
PFINAL	Mínimo		0,25	0,69
TFINAL	Máximo	230,5	243,92	
Solução				
PI		TFUSÃO		
83,2901		245		
Predição de Respostas				
PFINAL		TFINAL		
0,2847		243,329		

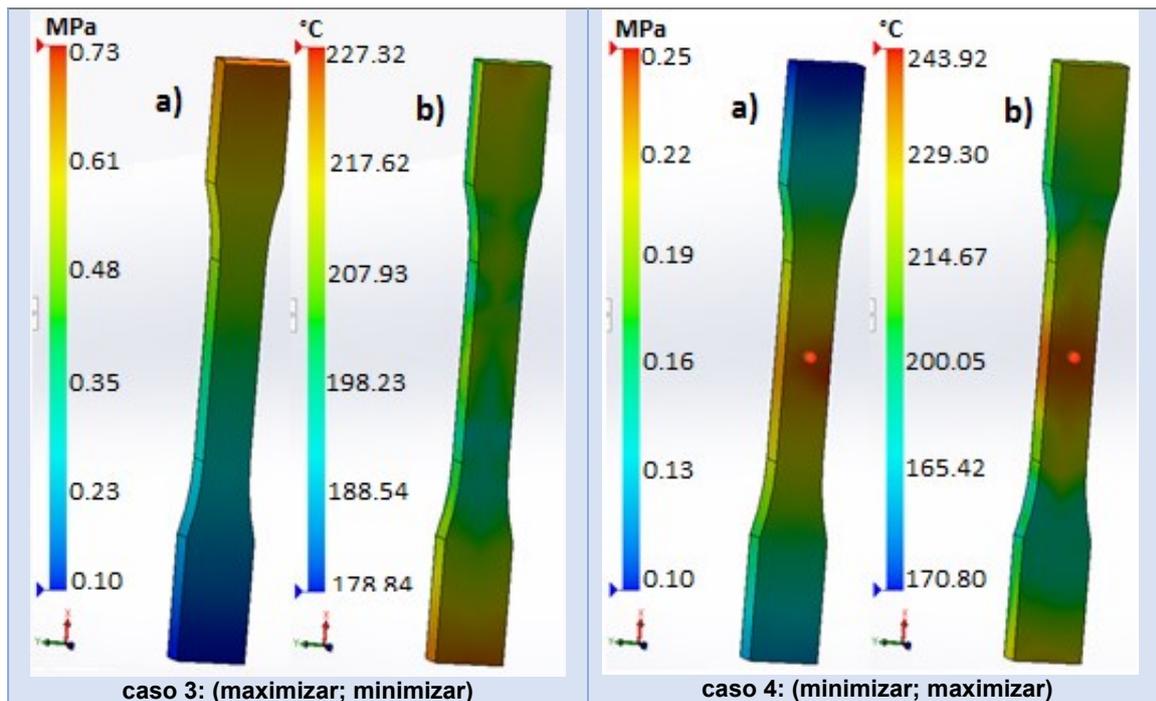
A Tabela 34 e o gráfico (APÊNDICE E - Figura 33) mostram a solução de otimização para o caso 4, em que PFINAL deve ser mínimo e TFINAL deve ser máximo. O objetivo, então, é PFINAL igual a 0,25 Mpa e TFINAL igual 243,92, e a predição de respostas após a simulação com os valores de solução (PI = 83,2901 e TFUSÃO = 245) é de PFINAL igual 0,2847 e TFINAL igual a 243,329.

### 6.2.3. Simulação para os Valores Otimizados

O APÊNDICE C apresenta os resultados das simulações com valores otimizados de PFINAL e TFINAL pro Polietileno, os perfis de PFINAL e TFINAL são exibidos a seguir na Tabela 31 e através de sua análise pode-se identificar os efeitos gerais de cada caso de otimização.

Tabela 31 - Perfil de a) Pressão Final e b) Temperatura Final para os casos de otimização de resposta do processo de injeção plástica do Polietileno.





Analisando visualmente pode-se verificar que o caso em que a otimização gera perfis com melhor distribuição de TFINAL e PFINAL é apresentado na opção a) [min; min], assim como para o polipropileno.

### 6.3. Eficiência do Planejamento Fatorial

O objetivo do planejamento fatorial é reduzir o número de experimentos que se deve fazer, diminuindo conseqüentemente o tempo gasto para sua execução e matéria-prima gasta. Um questionamento que pode ser feito é se a redução de dados analisados influencia na análise de regressão do modelo gerado, em outras palavras, se a quantidade de dados é suficiente para gerar um modelo de significância estatística.

Sem o planejamento fatorial, o comum é que se execute os experimentos em todas as combinações possíveis dos valores das variáveis preditoras. Para o caso do polipropileno, estudado neste trabalho, sem o planejamento fatorial, foram feitas 70 simulações de injeção plástica, resultando em uma quantidade bem maior de dados a serem analisados.

Tabela 32 - Sumário do modelo de regressão ajustado para TFINAL do polipropileno sem planejamento

R2	R2(aj)
91,75%	91,37%

Tabela 33 - Sumário do modelo de regressão ajustado para TFINAL do polipropileno com planejamento

R2	R2(aj)
82,02%	76,03%

As tabelas 37 e 38 apresentam os resultados para os modelos de regressão ajustados para o polipropileno com e sem planejamento fatorial respectivamente. Ambos os modelos conseguem descrever mais 80 % do comportamento dos dados analisados, sendo assim, a quantidade de dados utilizada no planejamento CCD é suficiente para gerar resultados tão satisfatórios quanto o método que analisa todas as combinações possíveis.

A escolha de qual método utilizar, por sua vez, depende das condições de execução da pesquisa. Casos em que o tempo seja curto, o ideal é utilizar-se do método de planejamento fatorial, já para casos em que o tempo não seja uma variável limitante e a acurácia das respostas seja necessária, pode-se executar o maior número de experimentos possíveis a fim de se obter modelos de regressão que expliquem o máximo possível do comportamento dos dados analisados.

## **7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **7.1. Conclusão Geral**

O Ponto de Injeção é uma variável importante no desenvolvimento de projetos de injeção plástica e no controle de defeitos e propriedades finais da peça moldada. Isso pode ser identificado pela sua influência significativa sobre a variável de resposta PFINAL para os dois materiais (PP e PE), conforme a análise de regressão feita neste trabalho.

PFINAL, que mostrou-se mais fortemente influenciada pelo posicionamento do PI, está relacionada com propriedades mecânicas, como resistência, uma vez que a concentração de pressão pode indicar fragilidade por concentração de tensões, além de influenciar na ocorrência de rechupe. Já TFINAL, mostrou-se mais influenciada pela variável preditora TFUSÃO, estando diretamente relacionada a propriedades químicas, como densidade e temperatura de trabalho da peça final.

PI quando posicionado na região central da peça pode reduzir a pressão final em mais de 50% para os casos estudados, esta posição diminui a fluxo de injeção e a pressão solicitada para preenchimento total do molde, gerando consequentemente Pressões Finais menores que os outros pontos para o mesmo valor da variável preditora TFUSÃO.

PFINAL é maior próximo à região do ponto de injeção, podendo gerar maior fragilidade nesta região. Uma distribuição não homogênea tanto de PFINAL como de TFINAL corrobora para o aparecimento de rechupes devido a contração irregular. Este problema pode ser resolvido pelo reposicionamento do PI e modificação da TFUSÃO, dentre outros parâmetros. Temperaturas menores de molde e processo também podem gerar menores contrações, empenamento e perda de propriedades químicas e mecânicas.

O posicionamento de PI e o valor de TFUSÃO que apresentaram menor TFINAL, e ,por isso, geram menor degradação e perda de propriedades químicas, para a peça estudada são:

-Para o polipropileno: PI = 86,667mm e TFUSÃO = 242 °C no caso 1: (Minimizar; Minimizar). Que apresenta a menor TFINAL entre os casos simulados igual 241,02°C;

-Para o polietileno: PI = 165mm e TFUSÃO = 232 °C, no caso 3: (Maximizar; Minimizar), que apresenta a menor TFINAL entre os casos simulados igual a 227,32°C.

O posicionamento de PI e valor de TFUSÃO que apresentaram menor PFINAL, e, por isso, geram menor perda de propriedades mecânicas, para a peça estudada são:

-Para o polipropileno: PI = 86,667 mm e TFUSÃO = 242 °C no caso 1: (minimizar; minimizar), que apresenta a menor PFINAL entre os casos simulados igual a 0,82 MPa.

-Para o polietileno: PI = 83,29 mm e TFUSÃO = 245 °C no caso 4: (minimizar; maximizar) para o polietileno, que apresenta a menor PFINAL entre os casos simulados igual a 0,25 Mpa.

A otimização das respostas para PFINAL e TFINAL a partir dos valores de PI e TFUSÃO mostra-se relevante na prevenção de defeitos como perda de

propriedades químicas por degradação térmica, empenamento por aumento do ciclo devido a altas temperaturas de fusão e rechupe devido a resfriamento não homogênea, além de perda de propriedades mecânicas, como resistência ao impacto, devido a fragilização de regiões onde há acúmulo de tensões por altas pressões, uma vez que controla os resultados daquelas variáveis ao fim do processo.

#### **7.2. Recomendações para Trabalhos Futuros**

- Testar resultados de otimização para injeção plástica real e comparar resultados;

## 8. REFERÊNCIAS

4IENG. **6 passos para sua primeira simulação no SOLIDWORKS**. c2021. Disponível em: <<https://www.4ieng.com.br/single-post/6-passos-para-sua-primeira-simulacao-no-solidworks>>. Acesso em: 19 de julho de 2023.

AMARAL, Fernando Ferraz; ALMEIDA, Fabrício Alves de; COSTA, Sebastião Carlos; LEME, Rafael Coraldi; PAIVA, Anderson Paulo . Aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta para Otimização do Processo de Solda a Ponto no Aço Galvanizado AISI 1006. **Soldagem e Inspeção**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 129–142, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1248-05**: Standard Specification For Polyethylene Plastics Extrusion Materials For Wire And Cable. West Consohohoken: 2005.

ASTM D638-14

ASSIS, Marcos; SANTOS, Taidés. Propriedades químicas, problemas ambientais e reciclagem de plástico: uma revisão de literatura. **Jorn. Internacional de Biociências**. v.5, n.1, 2020.

BARROS, ANA LUIZA BESSA DE PAULA. Revisitando O Problema De Classificação De Padrões Na Presença De Outliers Usando Técnicas De Regressão Robusta. 2013, tese.

CHAVES, Anderson *et al.* Utilização de ferramentas estatísticas em artigos sobre Contabilidade Financeira – um estudo quantitativo em três congressos realizados no país. **Revista contemporânea de Contabilidade**. v. 1, n. 14, p. 11–28, 2010.

COSTA, Helena *et al.* Plásticos de uso único no turismo costeiro: um debate urgente. 2022.

DE CASTRO, Denise Leal; CAVALCANTE, Maxwell De Paula; PEDROSA, Maria Clara Guimarães. Nanotecnologia e polímeros: revisão dos temas visando a abordagem em aulas de Química. **Revista Thema**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 313-3030, 2019.

DIAS DE ARAÚJO, Diego; SOUZA RIBEIRO, Nayara; COUTO MACHADO CHIANCA, Tânia. Efetividade do filme de polietileno na prevenção de olho seco em pacientes críticos: revisão sistemática. **Enferm. Foco**. P. 77-81, 2017.

DOTTI, F.E.; FEBBO, S.P. Machado; SARAIVA, M.; STORTI, M.A. parâmetros dos algoritmos genéticos na otimização de vigas de concreto armado simplesmente apoiadas: uma revisão crítica. **Asociación Argentina de Mecânica Computacional**. Vol. XXXIX, p. 1047-1056. 2022.

ESTORILIO, Carla Cristina; HATAKEYAMA, Kazui. Problemas na integração de sistemas cad/cae/cam no processo de injeção de plástico. CEFET/PR. 2018, teses.

FERREIRA, Sergio L.C. *et al.* Multivariate optimization techniques in food analysis – A review. **Elsevier - Food Chemistry**. 273 (2019) 3-8. 2017.

FERRI, Felipe H. *et al.* Planejamento de misturas e visualização da região ótima com planilhas no excel: um tutorial. **Quim. Nova**. Vol. 44, n7, p 874-881. 2021.

GALDAMEZ, Edwin V. Cardoza; CARPINETTI, Luiz C. Ribeiro. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 121–134, 2004.

GAVA, Daniel Pazetto; MILANEZ, Alexandre. Projeto de molde para injeção aplicado a fabricação de tampas de. **SATC educação e tecnologia**. 2019.

GUAMÁN, Edwin R. *et al.* Parámetros del Múltiple de Escape para su Diseño Computacional: unarevisión. **Información Tecnológica**, Vol. 30, n. 6, 2019.

GUSTAVO, Luiz; RICARDO, Paulo. Influência do tamanho da malha no tempo de simulação via software CAE. **Unisoscience**. 2021.

HELP SOLIWORKS. **Solidworks Plastics**. c2023. Disponível em: <[https://help.solidworks.com/2017/portuguese-brazilian/solidworks/sldworks/c\\_SOLIDWORKS\\_Plastics\\_Welcome.htm](https://help.solidworks.com/2017/portuguese-brazilian/solidworks/sldworks/c_SOLIDWORKS_Plastics_Welcome.htm)>. Acesso em: 19 de julho de 2023.

HELP SOLIDWORKS. **Bancos de dados de materiais do Plastics no 3D contentCentral**. 2020. Disponível em: <[help.solidworks.com/2020/Portuguese-brazilian/WhatsNew/c\\_material\\_3dcontentcentral.htm](https://help.solidworks.com/2020/Portuguese-brazilian/WhatsNew/c_material_3dcontentcentral.htm)>. Acesso em: 19 de julho de 2020.

JÚNIOR, Nilson José de Oliveira *et al.* O Impacto da digitalização no processo produtivo de injeção plástica. **Revista de Gestão e Secretariado**. v. 14, n. 1, p. 332–346, 2023.

MAINARDI, Pedro Henrique; DINO BIDOIA, ; Ederio. Modelos Estatísticos Fatoriais: Conceitos e Aplicações. ISSN 2178-0471. v.11, n1, p. 32-49, 2020.

MONTEIRO, Ana Carolina Leal *et al.* Avaliação dos métodos de obtenção e propriedades de nanocompósitos de polímeros com nanotubos de carbono – uma revisão. **Revista Liberato**, [s. l.], v. 23, n. 39, p. 61–76, 2022.

NAZÁRIO, Gabriel; SILVA, Vitor Crescencio; ROCHA, Anderson H.S.; RODRIGUES, Felipe Reis; LIMA, Fernando Parra dos Anjos. Madeira plástica: uma revisão conceitual. **Revista Engenharia em ação**, v.01, n 01, p.54-57, 2016.

NOVAES, C. G. *et al.* Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies De Resposta - Parte I: Variáveis de Processo. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, p. 1184–1215, 2017.

PEREIRA, Tainá Da Conceição; ARAÚJO, Daniele Barcelos; BILA, Daniele Maia. Microplásticos em estação de tratamento de esgoto – uma revisão. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 14, n. 2, p. 917, 2021.

PITT, Fernando Darci; BOING, Denis; BARROS, António André Chivanga. Desenvolvimento Histórico, Científico e Tecnológico de Polímeros Sintéticos e de Fontes Renováveis. **Revista Unifebe**, n. 9, p. 18, 2011.

RICARDO, Paulo; COSTA, Yamashita; KIAM, Thyago M. Estudo comparativo em canais de alimentação para moldes de injeção de termoplásticos auxiliado pela simulação computacional. **10º CBPol**, Outubro, 2015.

ROSÁRIO, Francisco; PACHEKOSKI, Wagner M.; SILVEIRA, Ana P.J.; SANTOS, sérgio F.; CASARIN, Suzan Aline. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Tecnologia de Produção em Plástico, FATEC**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 90–97, 2011.

STAT EASE. **Central Composite Design**. c2023. Disponível em: <<https://www.statease.com/docs/v13/contents/response-surface-designs/central-composite-design/>>. Acesso em: 17 de julho de 2023.

SUPPORT MINITAB. **What are response surface designs, central composite designs, and box-behnken designs?**. c2023. Disponível em: <<https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/#:~:text=Central%20composite%20designs%20are%20a,%2D%20and%20second%2Dorder%20terms>>. Acesso em: 17 de julho de 2023.

SUPPORT MINITAB. **Equação de Regressão de Ajuste do modelo de regressão**. c2023. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/regression-equation/>>. Acesso em: 16 de julho de 2023.

TEÓFILO, Reinaldo F.; FERREIRA, Márcia M. C.. **Quimiometria II: Planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial**. Vol. 29, n 2, p. 338-350. 2006.

## APÊNDICE A – GRÁFICOS DE PARETO PARA OS EFEITOS PADRONIZADOS NO POLIPROPILENO

Figura 22 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados da variável de resposta TFINAL do Polipropileno

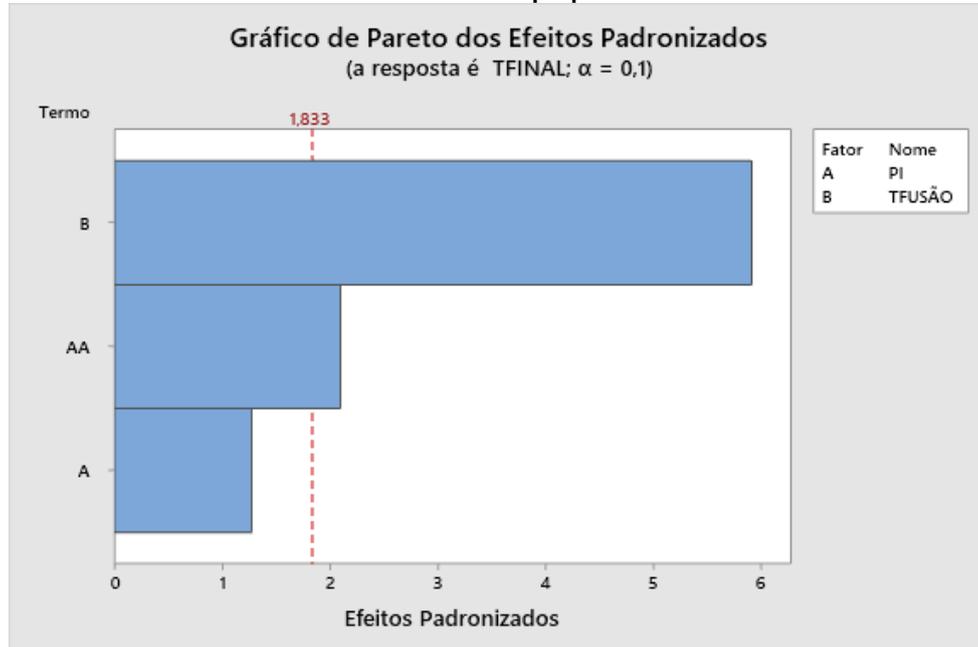
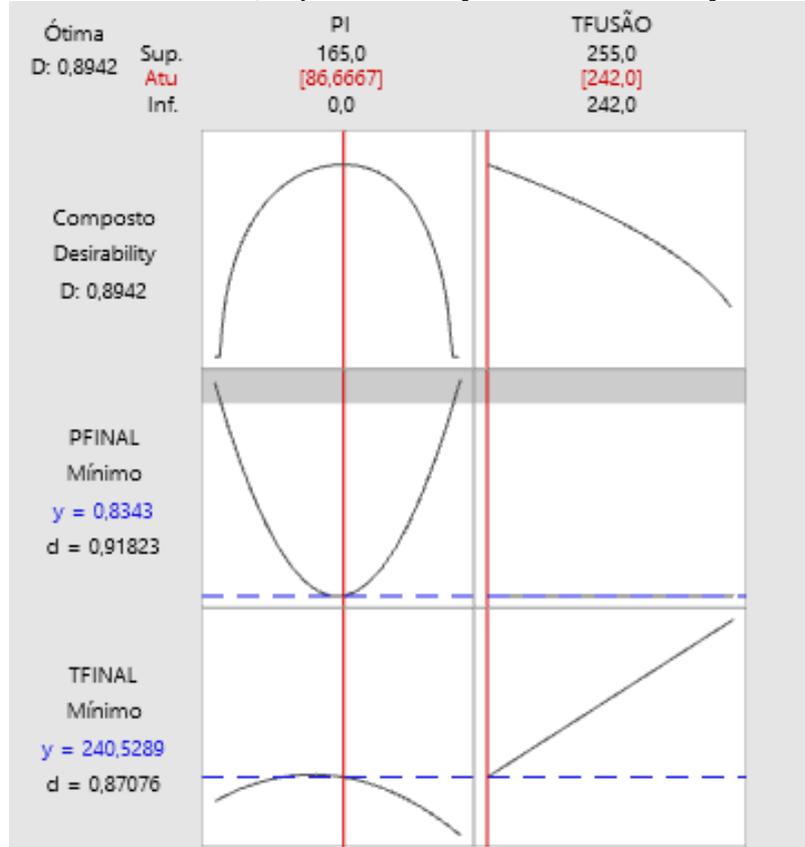


Figura 23 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável de resposta PFINAL do Polipropileno



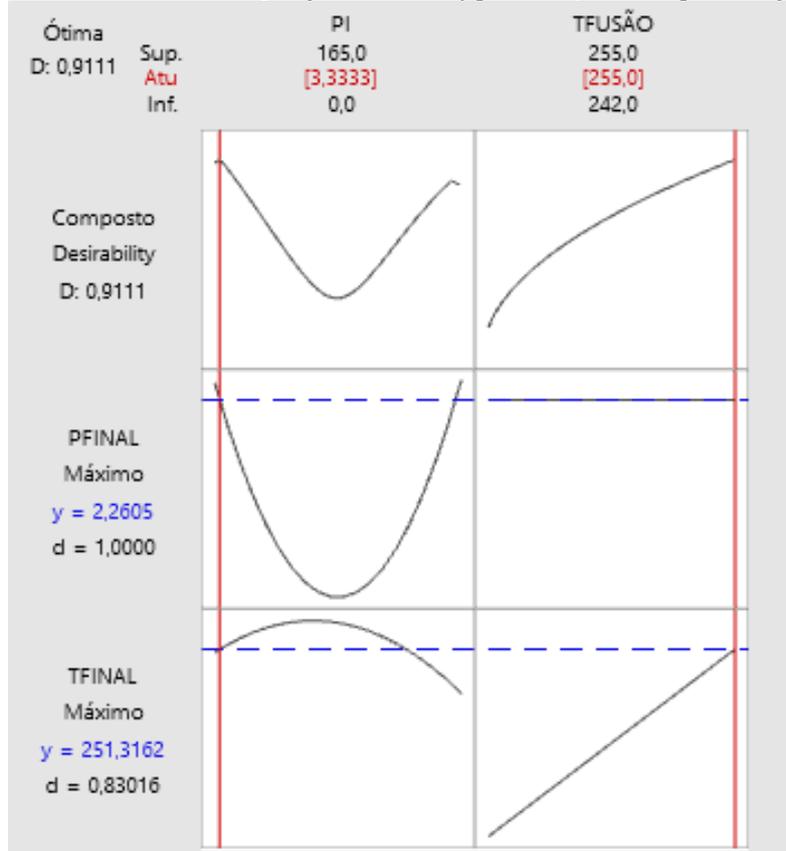
## APÊNDICE B – GRÁFICOS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEJABILIDADE PARA O POLIPROPILENO

Figura 24 - Gráfico de otimização para o caso 1 [minimizar; minimizar] do Polipropileno



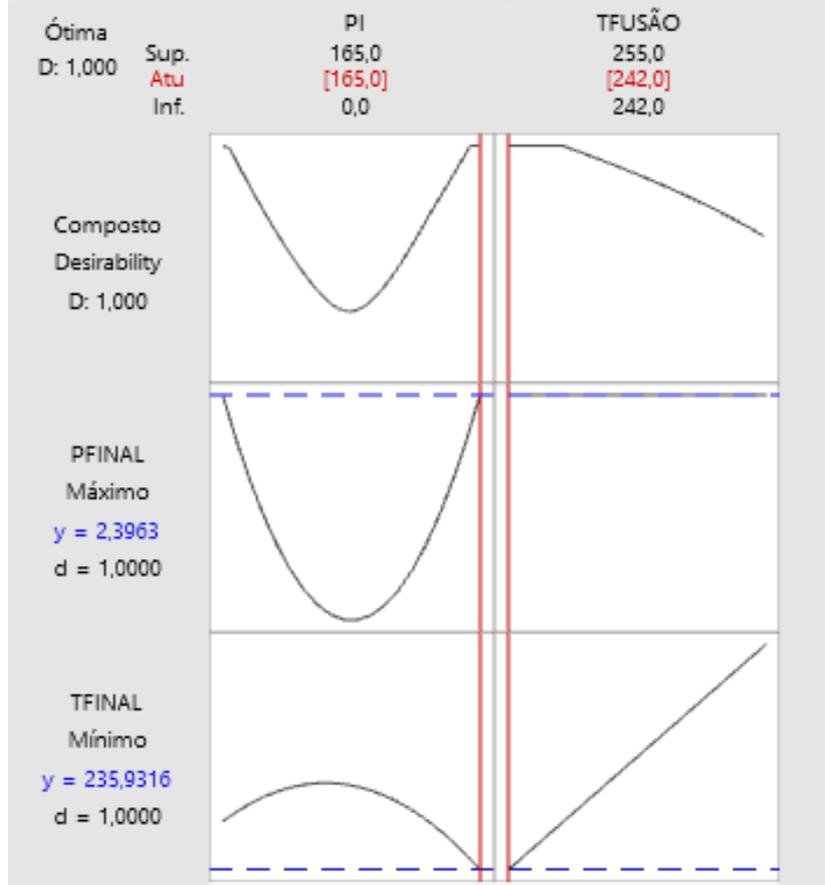
A desejabilidade composta (Figura 24)  $D=0,8942$ , indica que a solução alcança respostas favoráveis para todas as variáveis de resposta. No entanto, as desejabilidades individuais indicam que a solução é mais eficaz em minimizar PFINAL ( $d=0,91823$ ) que minimizar TFINAL ( $d=0,87076$ ). Assim, se para o caso otimizado for mais importante minimizar a TFINAL, o valor das variáveis preditoras podem ser ajustados.

Figura 25 - Gráfico de otimização para o caso 2) [máximo; máximo] do Polipropileno



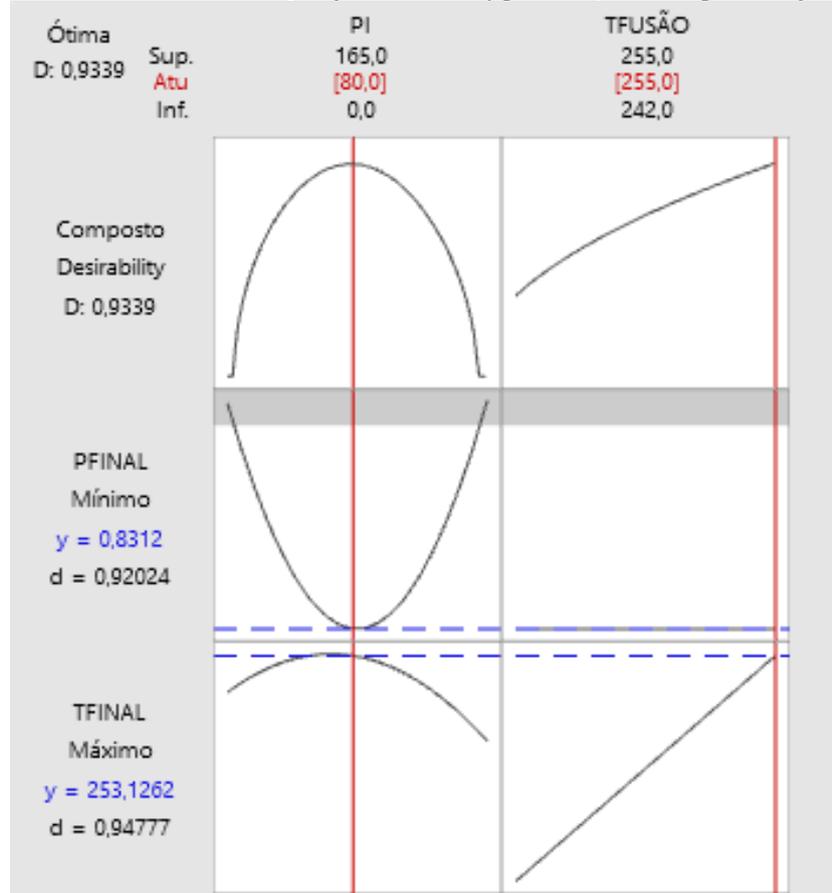
Para o caso 2 (Figura 25), a desejabilidade composta ( $D=0,9111$ ) indica que a solução apresenta respostas muito razoáveis para ambas as variáveis de resposta. Já a desejabilidade individual mostra que a solução é perfeitamente eficaz para minimizar PFINAL ( $d=1$ ) e menos eficaz para minimizar TFINAL ( $d=0,83016$ ).

Figura 26 - Gráfico de otimização para o caso 3) [máximo; mínimo] do Polipropileno



Para o caso 3 (Figura 26), desejabilidade composta (D=1) indica que a solução é totalmente eficaz em apresentar a resposta esperada para as duas variáveis resposta, PFINAL (d=1) e TFINAL (d=1).

Figura 27 - Gráfico de otimização para o caso 4) [mínimo; máximo] do Polipropileno



Para o caso 4 (Figura 27), a deseabilidade composta ( $D=0,9339$ ) indica que a solução de otimização gera respostas razoáveis para as variáveis de resposta. As deseabilidades individuais, por sua vez, mostram que a solução é mais eficaz em maximizar TFINAL ( $d=0,94777$ ) que minimizar PFINAL ( $d=0,8312$ ).

## APÊNDICE C – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM VALORES OTIMIZADOS DO POLIPROPILENO

### Caso 1 [minimizar; minimizar]

Tabela 34 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; minimizar) da injeção plástica com Polipropileno

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	86,6667	84,61
TFUSÃO (°C)	242	242
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	0,8343	0,82
TFINAL (°C)	240,529	241,02

### Caso 2 [maximizar; maximizar]

Tabela 35 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (maximizar; maximizar) da injeção plástica com Polipropileno

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	3,3333	4,23
TFUSÃO (°C)	255	255
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	2,26	1,97
TFINAL (°C)	251,32	255,00

### Caso 3 [maximizar; minimizar]:

Tabela 36 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; maximizar) da injeção plástica com Polipropileno

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	165	165
TFUSÃO (°C)	242	242
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	2,396	2,40
TFINAL (°C)	235,93	236,26

#### Caso 4 [minimizar; maximizar]:

Tabela 37 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; maximizar) da injeção plástica com Polipropileno

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	80	80,12
TFUSÃO (°C)	255	255
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	0,8312	1,04
TFINAL (°C)	253,13	253,92

## APÊNDICE D – GRÁFICOS DE PARETO PARA OS EFEITOS PADRONIZADOS NO POLIETILENO

Figura 28 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável TFINAL do Polietileno

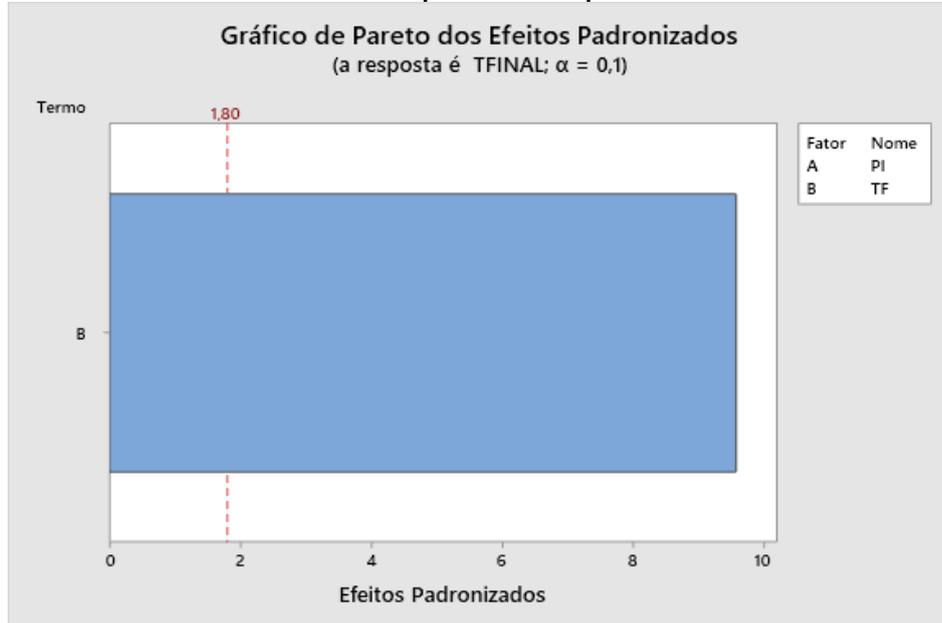
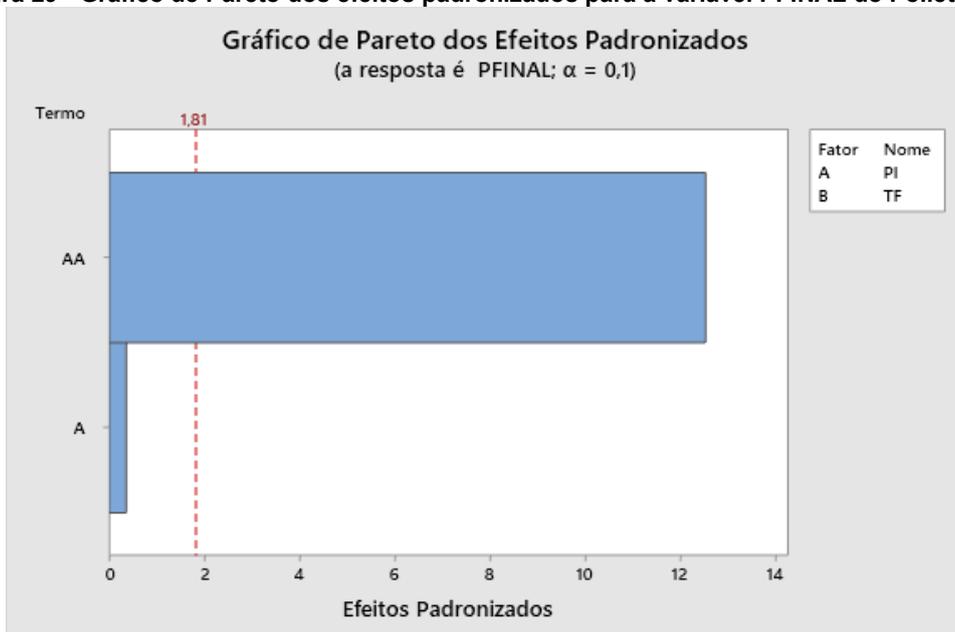
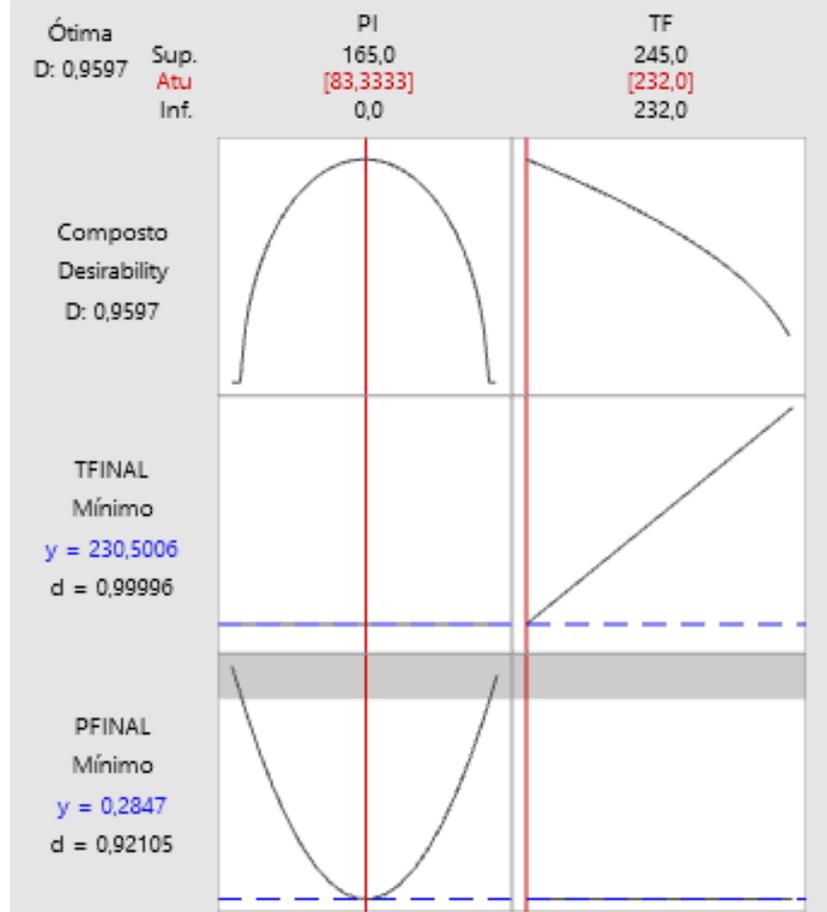


Figura 29 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a variável PFINAL do Polietileno



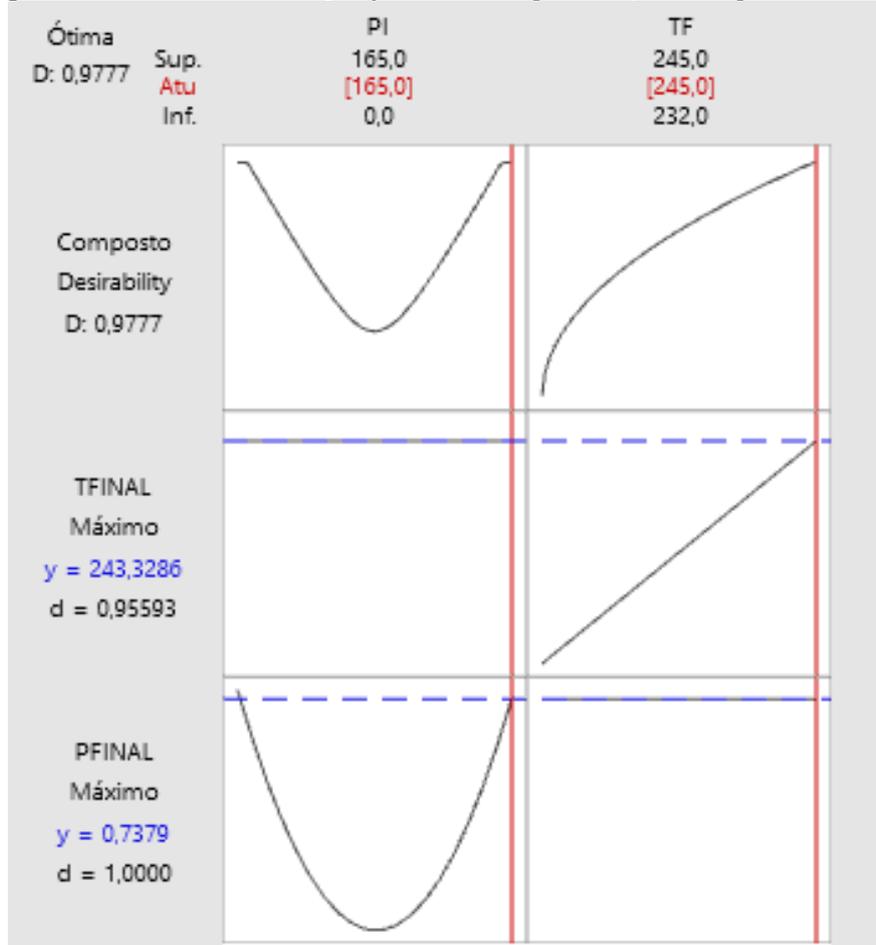
## APÊNDICE E – GRÁFICOS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEJABILIDADE PARA O POLIETILENO

Figura 30 - Gráfico de otimização para o caso 1) [mínimo; mínimo] do Polietileno



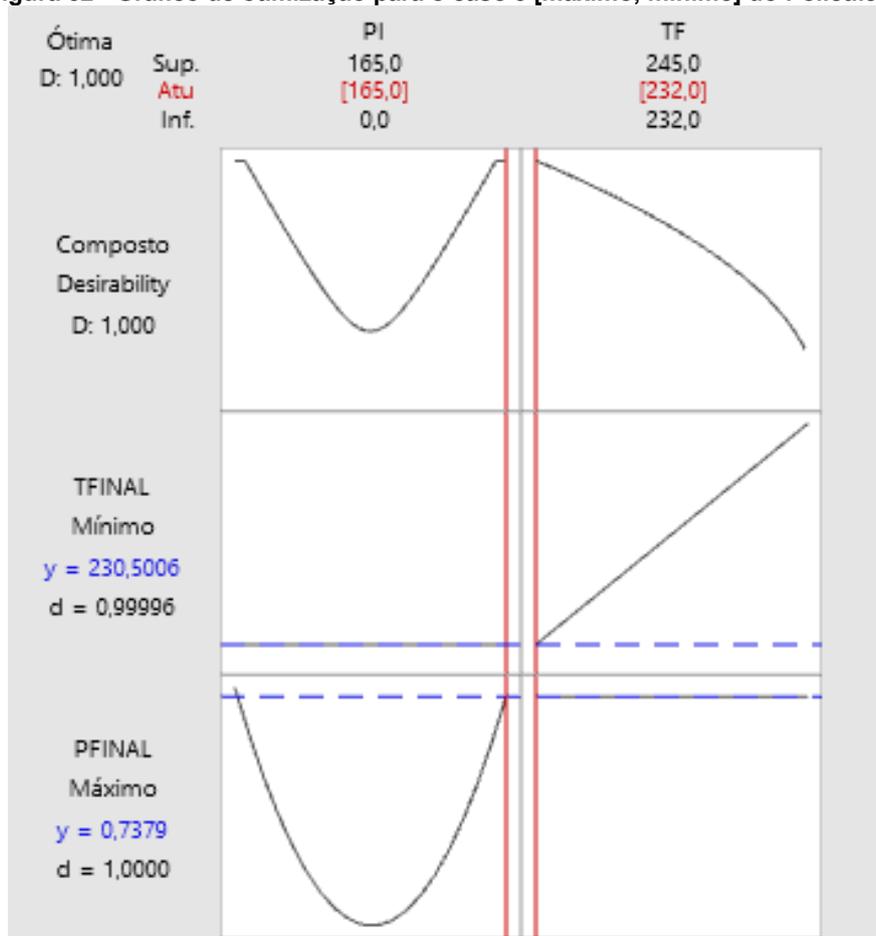
A desejabilidade composta é  $D=0,9597$ , valor próximo de 1, o que indica que a solução para este caso de otimização alcança resultados favoráveis para todas as respostas. Já a desejabilidade individual indica que a solução é mais eficaz na minimização de TFINAL ( $d=0,99996$ ), que na minimização de PFINAL ( $d=0,92105$ ), o que significa que se a minimização de PFINAL for mais importante, o usuário pode ajustar as definições da função de otimização.

Figura 31 - Gráfico de otimização para o caso 2 [máximo; máximo] do Polietileno



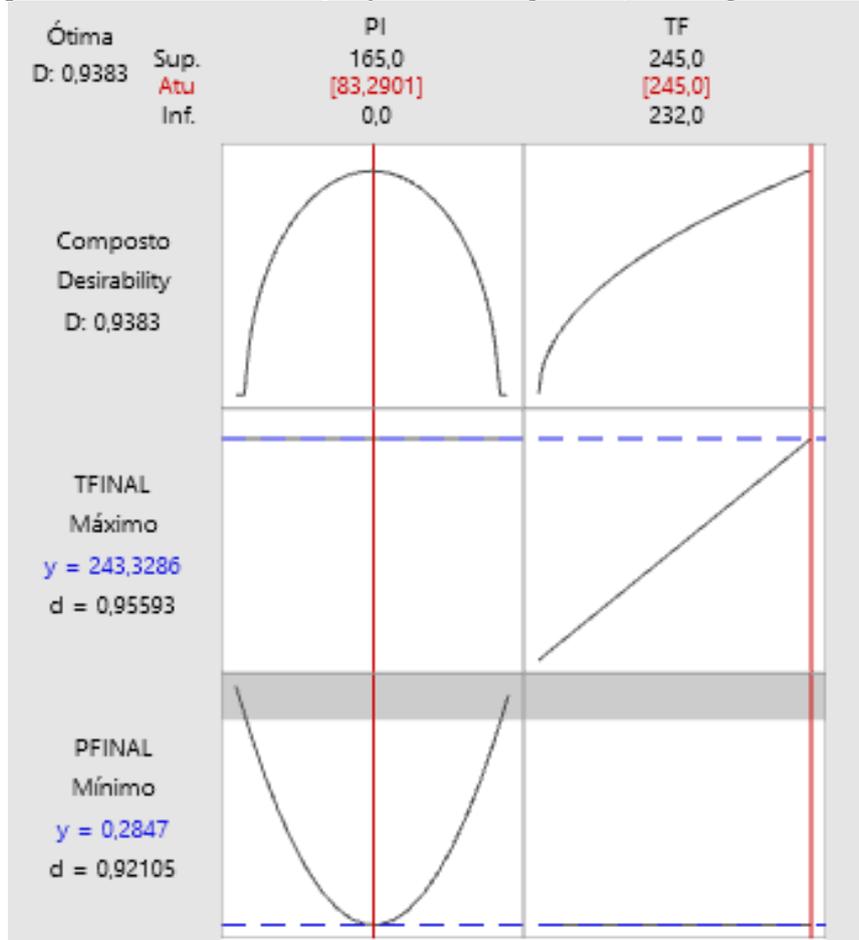
A desejabilidade composta ( $D=0,9777$ ) indica que a solução da otimização é eficaz em encontrar respostas razoáveis para as duas variáveis finais. A desejabilidade individual diz que a solução é totalmente eficaz para maximizar Pressão Final PFINAL ( $d=1$ ), e menos eficaz em maximizar TFINAL ( $d=0,95593$ ).

Figura 32 - Gráfico de otimização para o caso 3 [máximo; mínimo] do Polietileno



A desejabilidade composta ( $D=1$ ) indica que a solução da otimização é eficaz em encontrar respostas razoáveis para as duas variáveis finais. A desejabilidade individual diz que a solução é totalmente eficaz para maximizar Pressão Final PFINAL ( $d=1$ ), e menos eficaz em minimizar TFINAL ( $d=0,99996$ ), mas ainda assim entrega resposta muito próxima da desejada.

Figura 33 - Gráfico de otimização para o caso 4 [mínimo; máximo] do Polietileno



A desejabilidade composta ( $D=0,9383$ ) indica que a solução da otimização é eficaz em encontrar respostas razoáveis para as duas variáveis finais. A desejabilidade individual é mais eficaz para maximizar TFINAL ( $d=0,95593$ ), e menos eficaz em minimizar PFINAL ( $d=0,92105$ ), mas ainda assim entrega resposta muito próxima da desejada.

## APÊNDICE F – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM VALORES OTIMIZADOS DO POLIETILENO

### Caso 1: [minimizar; minimizar]

Tabela 38 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; minimizar) da injeção plástica com Polietileno

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	83,33	84,61
TFUSÃO (°C)	232	232
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	0,2847	0,28
TFINAL (°C)	230,501	231,02

### Caso 2: [maximizar; maximizar]

Tabela 39 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (maximizar; maximizar) da injeção plástica com Polietileno

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	165	165
TFUSÃO (°C)	245	245
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	0,7379	0,65
TFINAL (°C)	243,329	245,00

### Caso 3: [maximizar; minimizar]

Tabela 40 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (maximizar; minimizar) da injeção plástica com Polietileno

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	165	165
TFUSÃO (°C)	232	232
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	0,7379	0,73
TFINAL (°C)	230,501	227,32

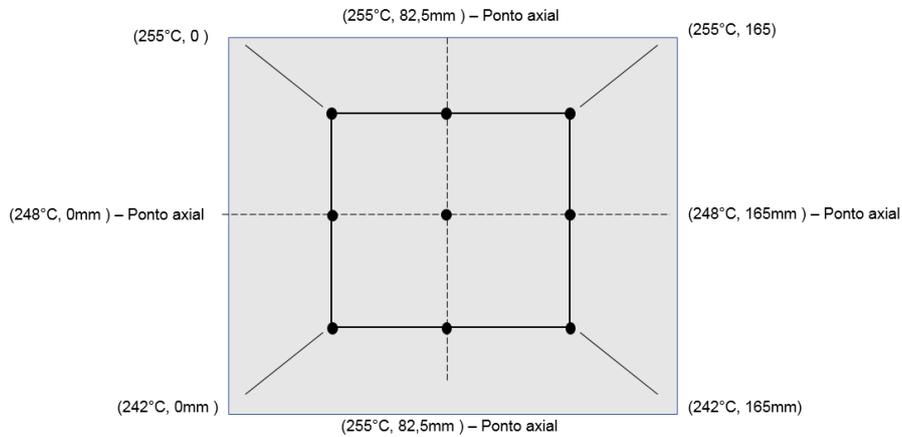
### Caso 4: [minimizar; maximizar]

**Tabela 41 - Parâmetros e Resultados de simulação para caso de otimização (minimizar; maximizar) da injeção plástica com Polietileno**

<b>Parâmetros</b>		
Variável Preditora	Configuração de otimização	Configuração de simulação
PI (mm)	83,29	84,61
TFUSÃO (°C)	245	245
<b>Resultados</b>		
Variável Resposta	Predição	Resultado da Simulação
PFINAL (MPa)	0,2847	0,25
TFINAL (°C)	243,329	243,92

## APÊNDICE G –REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PLANEJAMENTO COMPOSTO DE FACE CENTRADA

Figura 34 - Planejamento de Face Centrada para o Polipropileno



Conforme Tabela 1 os níveis (mínimo, máximo) para TFUSÃO e PI são: (242°C, 255°C) e (0,00mm,165mm) respectivamente. A Figura 34 exemplifica os níveis dos pontos fatoriais e axiais para um planejamento de face centrada.