

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

LETICIA VASCONCELOS

DESEMPENHO DE INSERTOS DE PLA EM MOLDES HÍBRIDOS NA INJEÇÃO DE  
PEÇAS EM POLIPROPILENO

Joinville

2023

LETICIA VASCONCELOS

DESEMPENHO DE INSERTOS DE PLA EM MOLDES HÍBRIDOS NA INJEÇÃO DE  
PEÇAS EM POLIPROPILENO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli

Joinville

2023

LETICIA VASCONCELOS

DESEMPENHO DE INSERTOS DE PLA EM MOLDES HÍBRIDOS NA INJEÇÃO DE  
PEÇAS EM POLIPROPILENO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 29 de junho de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Carlos Maurício Sacchelli, Dr  
Orientador

---

Prof. Wagner Maurício Pachekoski, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Écio José Molinari

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais, Egnaldo e Valdirene Vasconcelos, pela vida e os ensinamentos acerca da minha personalidade. Me incentivando nos momentos difíceis e que compreenderam a minha ausência enquanto me dedicava a vida acadêmica.

À minha irmã, Nathalia Vasconcelos, pelo companheirismo na minha infância me acompanhando nas mais diversas aventuras.

Ao meu grude diário, meu cachorro Horácio José, por me ensinar o que é o amor verdadeiro e incondicional.

Ao meu coordenador, Carlos Mauricio Sacchelli, pela presença ao longo de toda a trajetória da elaboração deste trabalho.

Agradeço ao João Victor, Rodrigo e Julia que não mediram esforços para me auxiliar durante a realização dos experimentos.

Agradeço às minhas amigas do grupo “Ladeira abaixo”, Mariana Rampazzo e Rayana Barbosa, que fizeram desta árdua trajetória acadêmica mais suave e menos solitária.

Agradeço ao meu namorado, Rafael Chiara, que jamais negou apoio, carinho e incentivo. Obrigada por todo suporte e paciência, sem você ao meu lado esse trabalho não seria possível.

Com grandes poderes vem grandes responsabilidades.

(Tio Ben, 1987)

## RESUMO

Os componentes obtidos pelo processo de injeção estão sendo utilizados cada vez mais, principalmente na indústria automotiva por ter como objetivo contribuir para a redução do peso dos veículos. Os processos envolvidos no projeto e na fabricação dos moldes ganharam atenção devido à grande complexidade e necessidade de baixo custo e curto tempo de manufatura, por isso, existe a necessidade de procurar tecnologias alternativas que respondam essas exigências. A utilização de técnicas de ferramental rápido (*Rapid Tooling* - RT) e prototipagem rápida (*Rapid Prototyping* - RP) são apresentadas como opção viável para a rápida obtenção de peças injetadas para pequenos lotes. Porém, um dos desafios presentes na utilização dessas técnicas é garantir que as peças resultantes atendam as características solicitadas para a sua aplicação, como também identificar qual a técnica de RP adequada, considerando aspectos de custos e qualidade do produto. Desta maneira o objetivo principal desse trabalho é analisar o desempenho do PLA (Poliácido láctico) em cavidades de moldes híbridos de injeção. As geometrias dos canais de alimentação foram definidas com o apoio de simulação computacional, a construção foi realizada pela técnica de deposição fundida (FDM) utilizando os materiais PLA e PLA com adição de fibra de carbono. As amostras obtidas foram analisadas com relação a suas propriedades mecânicas (resistência a tração) e geométrica (dimensional). Como conclusões têm-se que a utilização de moldes híbridos pode ser aplicável para lotes pequenos com baixa precisão dimensional, devido ao desgaste prematuro do canal de alimentação e a qualidade superficial dos produtos moldados faz-se necessário realizar uma investigação para melhoria dos parâmetros de construção dos insertos e processo de moldagem.

**Palavras-chave:** Molde Híbrido. Moldes de injeção. FDM. PLA. PP.

## ABSTRACT

The components obtained by the injection process are being more and more widely used, mainly in the automotive industry, as they aim to contribute to the reduction of vehicle weight. The processes involved in the design and manufacture of molds have gained attention due to their great complexity and the need for low cost and short manufacturing time, so there is a need to look for alternative technologies that respond to these requirements. Using rapid tooling techniques (Rapid Tooling - RT) and rapid prototyping (Rapid Prototyping - RP) is a viable option for quickly obtaining parts for small batches. However, one of the challenges presents in the use of these techniques is to ensure that the resulting parts meet the requested characteristics for their application, as well as to identify which RP technique is adequate, considering cost aspects and product quality. Thus, the main objective of this work is to analyze the performance of PLA (Polylactic acid) in hybrid injection mold cavities. The feed channel geometries were defined with the support of computational simulation, the construction was carried out by the fused deposition technique (FDM) using PLA and PLA materials with the addition of carbon fiber. The samples obtained were analyzed regarding their mechanical (tensile strength) and geometric (dimensional) properties. The conclusions are that the use of hybrid molds can be applicable for small batches with low dimensional accuracy, due to premature wear of the feed channel and the surface quality of molded products, it is necessary to carry out an investigation to improve the construction parameters inserts and molding process.

**Keywords:** Hybrid mould. Injection moulds. FDM. PLA. PP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1— Ciclo de injeção .....	18
Figura 2 – Máquina injetora convencional .....	19
Figura 3 – Molde de injeção .....	21
Figura 4 – Esquemático do processo de FDM .....	24
Figura 5 – Corpo de prova tração.....	30
Figura 6 – Corpo de prova impacto .....	30
Figura 7 – Molde: (a) Montagem do inserto; (b) Molde completo .....	31
Figura 8 – Malha 3D .....	31
Figura 9 – Simulação canais de injeção .....	32
Figura 10 – Máquina injetora.....	34
Figura 11 – Temperaturas das resistências do cilindro de plastificação .....	35
Figura 12 – Cavidade .....	36
Figura 13 – Posicionamentos dos sensores.....	36
Figura 14 – Central de aquisição de dados .....	37
Figura 15 – Pontos de medição do produto injetado .....	37
Figura 16 – Ensaio de tração: (a) Máquina de tração; (b) Pinça .....	38
Figura 17 – Equipamento para teste de impacto.....	39
Figura 18 – Preenchimento D1 e D2 Ø3 mm .....	40
Figura 19 – Preenchimento D1=3 mm e D2= 4 mm .....	40
Figura 20 – Preenchimento D1 e D2 Ø4 mm .....	41
Figura 21 – Preenchimento D1=3,5 e D2=4 .....	41
Figura 22 – Inserto I0, Inserto A, Inserto B e Inserto C antes do processo de injeção .....	42
Figura 23– Inserto C após FDM .....	43
Figura 24 – Rebarba .....	43
Figura 25 – Insertos após primeiro ciclo do processo: (a) Inserto C; (b) Inserto B....	44
Figura 26 – Extração do produto no inserto A .....	45
Figura 27 – Sensor tipo K alojado .....	45
Figura 28 – Dificuldade extração Inserto B e C .....	46
Figura 29 – Inserto I0 após processo de moldagem .....	46
Figura 30 – Análise térmica do ciclo de injeção sobre o inserto B .....	47

Figura 31 – Análise térmica do ciclo de injeção sobre o inserto C .....	48
Figura 32 – Detalhes da análise térmica do ciclo de injeção sobre o inserto C .....	48
Figura 33 – Deformação inserto A.....	49
Figura 34 – Simulação CAE: (a) Velocidade de injeção; (b) Taxa de cisalhamento máxima.....	50
Figura 35 – Deformação da entrada dos corpos de prova .....	50
Figura 36 – Impacto do sensor e pinos de extração no inserto C .....	51
Figura 37 – Fases do processo de moldagem inserto A .....	51
Figura 38 – Fases do processo de moldagem inserto B .....	52
Figura 39 – Fases do processo de moldagem inserto C .....	52
Figura 40 – Comparação da distribuição de temperatura nos insertos de aço e de PLA .....	53
Figura 41 – Fotografia térmica do inserto C .....	53
Figura 42 – Análise visual das amostras dos produtos injetados no Inserto C .....	54
Figura 43 – Produtos moldados no ciclo 11 e 17 .....	55
Figura 44 – Variação dimensional inserto A.....	55
Figura 45 – Análise visual das amostras dos produtos injetados no Inserto B.....	56
Figura 46 – Análise visual das amostras dos produtos injetados no Inserto C .....	57
Figura 47 – Deformação do pescoço do corpo de prova.....	57
Figura 48 – Deformação dos canais de alimentação (Cotas 3 e 4).....	58
Figura 49 – Deformação cotas 1 e 2 dos produtos.....	58
Figura 50 – Deformação cotas 5, 6 e 7 do corpo de prova de tração.....	59
Figura 51 – Deformação cotas 8 e 9 corpo de prova de impacto .....	59
Figura 52 – Deformação das espessuras (Cotas 10, 11, 12 e 13) .....	60
Figura 53 – Contração volumétrica .....	60
Figura 54 – Temperatura da peça no final do ciclo .....	61
Figura 55 – Variação de massa dos produtos moldados com Inserto A, B e C .....	62
Figura 56 – Massa simulada .....	62
Figura 57 – Tensão x Deformação Inserto A.....	63
Figura 58 – Tensão x Deformação Inserto B.....	63
Figura 59 – Tensão x Deformação Inserto C.....	64
Figura 60 – Valores do módulo de elasticidade.....	65
Figura 61 – Resistência ao impacto .....	66

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros do processo .....	35
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do material PLA conforme a literatura.....	16
Tabela 2 – Propriedades Típicas do PP.....	17
Tabela 3 – Parâmetro de solubilidade de Hildebrand.....	27
Tabela 4 – Parâmetros de impressão dos insertos.....	33
Tabela 5 – Ciclos de injeção.....	34
Tabela 6 – Valores máximos de resistência à tração no escoamento.....	64
Tabela 7 – Teste de impacto Izod.....	65
Tabela 8 – Resistência ao impacto.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno;

AM – *Additive Manufacturing*;

ASTM – *American Society for Testing and Materials*;

CAD – *Computer aided design*;

CAE – *Computer aided engineering*;

FDM – *Fused deposition modeling*;

PA – Poliamida;

PC – Policarbonato;

PE – Polietileno;

PP – Polipropileno;

PPSF – Polifenilsulfona;

POM – Polioximetileno;

RP – *Rapid prototyping*;

RT – *Rapid tooling*;

SLS – *Selective Laser Sintering*;

SL – Stereolithography (Estereografía);

Tg – Glass transition ;

Tm –Melting temperature;

PLA- Poliácido láctico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta$       Parâmetro de solubilidade de Hildebrand

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1. OBJETIVOS .....	14
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.1 PLA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.2 POLIPROPILENO</b> .....	<b>16</b>
2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO .....	17
<b>2.2.1 Molde de injeção</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2 Parâmetros do processo de injeção</b> .....	<b>21</b>
<u>2.2.2.1 Temperatura de injeção</u> .....	<u>21</u>
<u>2.2.2.2 Temperatura do molde</u> .....	<u>22</u>
<u>2.2.2.3 Pressão de injeção</u> .....	<u>22</u>
<u>2.2.2.4 Tempo de injeção</u> .....	<u>22</u>
<u>2.2.2.5 Rotação da rosca</u> .....	<u>23</u>
<u>2.2.2.6 Velocidade de injeção</u> .....	<u>23</u>
2.3 MANUFATURA ADITIVA.....	23
<b>2.3.1 Modelagem por deposição fundida (FDM)</b> .....	<b>24</b>
2.4 MOLDES HÍBRIDOS .....	25
<b>2.4.1 Insertos poliméricos</b> .....	<b>25</b>
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	28
2.6 FIBRA DE CARBONO .....	29
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>29</b>
3.1 GEOMETRIA DO PRODUTO.....	29
3.2 MOLDE.....	30
3.4 SIMULAÇÃO DA MOLDAGEM POR INJEÇÃO COM MOLDE HÍBRIDO .....	31
<b>3.4.1 Canais de injeção</b> .....	<b>32</b>
3.5 FABRICAÇÃO DOS INSERTOS POR FDM.....	33
3.6 PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO COM MOLDE HÍBRIDO .....	33
3.7 ANÁLISE DOS INSERTOS E PRODUTOS.....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>39</b>

4.1 ANÁLISE DOS INSERTOS .....	39
4.2 ANÁLISE DOS PRODUTOS .....	53
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE A - PARÂMETROS UTILIZADOS FDM .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE B – VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS PRODUTOS FINAIS .....</b>	<b>78</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de transformação de polímeros obteve faturamento de R\$ 90,8 bilhões, produzindo 7,3 milhões de toneladas de transformados plásticos, sendo 44% produzido pelo processo de injeção, apresentado pelo relatório anual da Associação Brasileira da Indústria do Plástico – ABIPLAST – de 2020. O mercado mundial de moldagem por injeção de plástico deve apresentar crescimento consistente até 2024, estima-se que o mercado seja avaliado em cerca de 345 bilhões de dólares (Iyer 2019). De acordo com Iyer (2019), um dos principais setores que contribuem para esse crescimento é o setor automotivo com o objetivo de melhorar a eficiência energética diminuindo a massa dos veículos.

Nas últimas décadas, as peças injetadas evoluíram em tamanho e complexidade, com alta resistência e baixo peso, necessitando de eficiência na injeção. Para se atingir qualidade e rapidez nos atuais processos de injeção, houve avanços tanto nos processos quanto nas máquinas injetoras, ampliando a capacidade de injeção e a velocidade dos ciclos. Os moldes utilizados são cada vez mais resistentes, fabricados de materiais que atendam cada aplicação, com canais quentes e componentes padronizados, como aponta Harada (2004).

De acordo com Sacchelli (2007), somente após a finalização do desenvolvimento do molde, pode-se ter testes onde são detectadas falhas na produção do componente injetado, tais como os pontos de injeção mal localizados, defeitos decorrentes da refrigeração deficiente do molde, não preenchimento total das cavidades, deformação do material, linhas de solda, entre outros.

Para Anna (2008), um dos principais pontos desse avanço e solução para os problemas apontados por Sacchelli (2017), foi a implantação de programas CAD (*Computer-Aided Design*), CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) e CAE (*Computer-Aided Engineering*). Esses programas são ferramentas que auxiliam em todas as etapas de processamento de uma peça plástica, visando obter produto final com maior qualidade em menor tempo. Dentre esses sistemas, Sahputra (2007) destaca que as ferramentas CAE reduzem o tempo de desenvolvimento e permitem otimizar tolerâncias dimensionais das peças, sendo programas de simulação que possibilitam a predição da interação entre o design do produto e o molde.

A moldagem por injeção utilizando moldes de injeção convencionais é viável para a produção de um alto volume de peças, porém inviável para a produção de baixo volume, devido ao custo alto por peça.

Motivados pela necessidade de introduzir rapidamente novos produtos no mercado, cresce a necessidade de oferecer soluções para o minimizar o tempo de desenvolvimento e manufatura do molde. Uma metodologia alternativa visando atender esta necessidade é a prototipagem rápida, como apontam Chua et al. (1999). Dentre as técnicas de prototipagem rápida Rajaguru, Duke e Au (2015) apontam o crescente interesse do uso de manufatura aditiva (AM- *Additive Manufacturing*) para construção de ferramental. Segundo Bareta (2007), a utilização de AM para produção de ferramental reduz 45% do tempo de fabricação e 69% do custo final. Assim, viabilizando a produção em baixa escala.

O desenvolvimento de moldes híbridos possibilita a fabricação de insertos com materiais alternativos. Insertos são parte do molde de injeção que compreende a região moldante, sua fabricação é realizada separadamente e posteriormente montada nas placas do molde (Ribeiro Jr., 2023). Saraiva et al. (1999) descrevem moldes híbridos como ferramentas que utilizam diferentes materiais e tecnologias para fabricação de moldes de injeção de plástico. Trazendo vantagens como redução do consumo de energia na produção, flexibilidade na modificação e implementação de conceitos de projeto e possibilidade de customização.

Foggiatto et al (2004) afirmam que a técnica de AM está sendo desenvolvida e utilizada com sucesso na técnica de ferramental rápido são os processos de Estereografia (SL) e de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), porém o processo de Modelagem por Deposição Fundida (FDM) ainda é pouco explorado.

De acordo com a revisão da literatura do presente trabalho, o ABS tem sido o material mais explorado para essa aplicação utilizando FDM, contudo o mesmo apresenta um custo elevado, assim, o presente trabalho explorou como alternativa com a utilização de PLA pelo fato de possuir as características de facilidade de impressão, biodegradabilidade e menor custo.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo é analisar o desempenho de moldes híbridos com inserto de PLA e PLA com 20% de fibra de carbono, fabricados pelo processo FDM para injeção de polipropileno (PP).

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Analisar as características físicas dos insertos após o final dos ciclos moldagem por injeção;
- Analisar as propriedades mecânicas e físicas dos produtos moldados;

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O presente capítulo visa rever os principais conceitos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho.

### **2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS**

“Polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia, denominadas meros” (MANO, 1999, p.20)

De acordo com Harada (2004), o plástico é um material polimérico de alta massa molar, sólido como produto final, podendo ser dividido em dois tipos, termoplásticos e termofixos. Termoplásticos têm como principal propriedade a fundição e solidificação do material sem alterar sua estrutura química, permitindo reprocessamento do material. Por outro lado, os termofixos ao serem fundidos sofrem uma transformação em sua estrutura química, impossibilitando a reversão ao estado original.

Segundo Manrich (2013), os polímeros também podem ser caracterizados pela sua transparência, densidade, rigidez dielétrica, resistência química, grau de deformação, coeficiente de expansão térmica entre outras propriedades, podendo, assim, serem definidos para cada aplicação.

Para a definição do tipo de processamento do polímero necessário para o produto final ser moldado na forma desejada, Manrich (2013) afirma que é necessário considerar as características finais desejadas do produto e se será termofixo ou termoplástico. Para polímeros termofixos são indicados processos de compressão e extrusão, para polímeros termoplásticos são indicados injeção, calandragem, sopro e termo formação (Manrich 2013).

#### **2.1.1 PLA**

O Políácido láctico (PLA) é um polímero biodegradável produzido a partir de recursos biológicos renováveis como amido e açúcares, suas propriedades são

mutáveis a depender da cristalinidade, peso molecular, estrutura do polímero, formação de material e do processamento. (Ghosh et al., 2010).

Atualmente, o PLA representa um dos materiais mais populares no âmbito da manufatura aditiva associado ao processo de FDM devido à alta resistência mecânica e facilidade de uso (Santana et al., 2018; Madhavan et al., 2010). Porém o material possui baixa resistência ao impacto restringindo sua aplicação (Camargo et al., 2019). Um resumo das principais propriedades do PLA é apresentado no Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do material PLA conforme a literatura.

Descrição	Valor	Referência
Temperatura de fusão (T <sub>m</sub> ) (°C)	170 a 180	PEREZ <i>et al.</i> , 2014; MENG <i>et al.</i> , 2012; AHMED, 2017.
Temperatura de transição vítrea (T <sub>g</sub> ) (°C)	55 a 65	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.24	NatureWorks
Calor específico	1800 J/kgC	Technical Data
Condutividade térmica (W/mC)	0.13W/mC	Sheet S030 - PLA (Polylactid Acid)
Coefficiente de expansão térmica (1/C°)	7e-5	Indusmart
Modulo de elasticidade (GPa)	2,02 - 4,00	GARLOTTA, 2001; LANZOTTI et al., 2015;
Resistência à tração (MPa)	15,5 – 72	
Resistência à tração (break) (MPa)	14 – 70	
Coefficiente de Poisson	0.3	NatureWorks

### 2.1.2 POLIPROPILENO

O polipropileno (PP) é um termoplástico rígido e semicristalino amplamente utilizado atualmente, que possui uma vasta variedade de aplicações domésticas e industriais. Em específico o Polipropileno H 105 da fornecedora Braskem é uma resina de polipropileno de alto índice de fluidez, aditivada para uso geral. A resina apresenta

excelente processabilidade e elevada rigidez sendo indicada para injeção de peças de parede fina e de alta produtividade (BRASKEM, 2017). Suas propriedades típicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades Típicas do PP

<b>Resistência à Tração no Escoamento</b>	39 MPa
<b>Alongamento no Escoamento</b>	8 %
<b>Resistência ao Impacto Izod a 23°C</b>	25 J/m

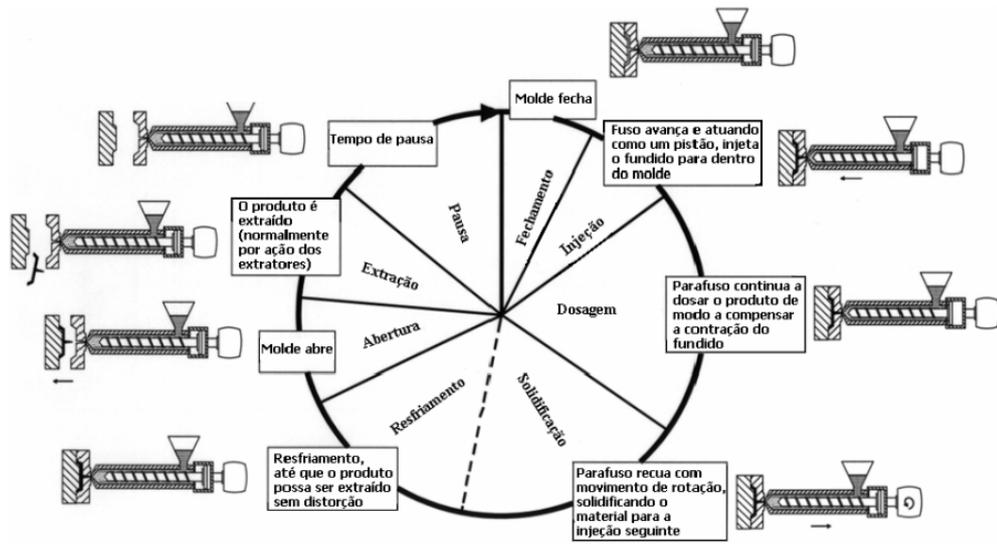
Fonte: BRASKEM (2017)

## 2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO

A injeção de plástico é um processo de fabricação utilizado para produzir uma ampla variedade de peças plásticas em larga escala. Para Manrich (2013) é um dos processos mais versáteis no campo da transformação e processamento de polímeros. Harada (2012) acrescenta que processo é favorável para produção de peças seriadas, de geometrias simples e complexas, elevada reprodutibilidade de detalhes e repetibilidade do processo, podendo ser totalmente automatizado.

Segundo Manrich (2013) diz que a injeção é um processo intermitente, onde cada ciclo é denominado ciclo de injeção. Harada (2004) pontua que o ciclo básico de injeção se inicia com o fechamento do molde e termina no início do próximo, esquematizado pela Figura 1. O ciclo contempla a somatória dos tempos de fechamento do molde, preenchimento das cavidades, recalque, resfriamento, abertura do molde e extração do produto, combinando inúmeras variáveis como pressão, temperatura e tempo.

Figura 1— Ciclo de injeção



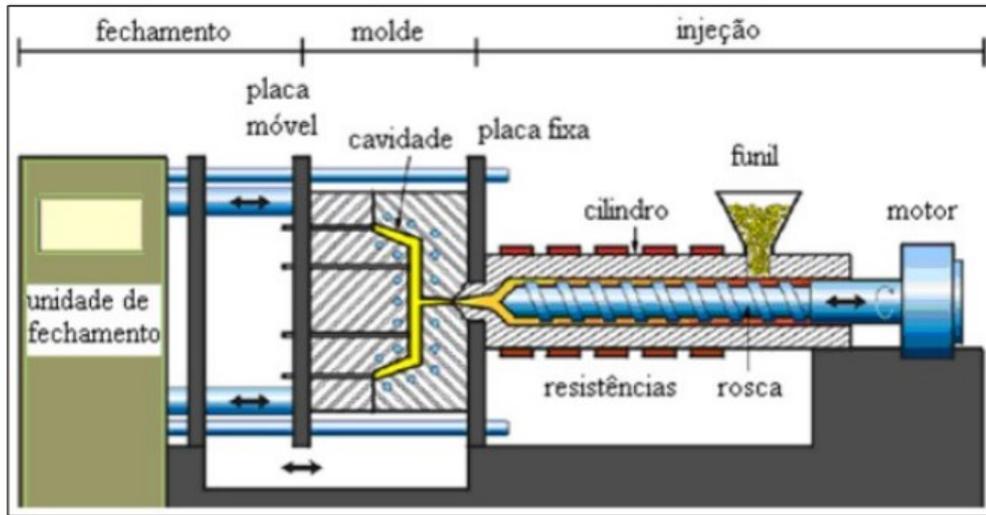
Fonte: CUNHA (2003)

Segundo Harada (2004) a moldagem por injeção, assim como em outros processos de manufatura poliméricas, consiste essencialmente em três estágios que são:

- **Plastificação:** onde o material polimérico é fundido e homogeneizado, permitindo sua modificação de forma.
- **Conformação:** etapa no qual o material fundido é moldado na forma desejada de um molde ou matriz, com o auxílio, ou não, de uma pressão externa.
- **Estabilização da forma:** onde ocorre o resfriamento e solidificação do material para manter a geometria conformada.

No processo de moldagem por injeção, essas etapas são realizadas em uma máquina injetora, apresentada na Figura 2, HARADA e UEKI (2012) dividem uma injetora em dois subsistemas principais, a unidade de injeção e a unidade de fechamento.

Figura 2 – Máquina injetora convencional



Fonte: Leães (2008, p. 6).

Na unidade de injeção, o polímero é inserido no funil de alimentação, conduzido até o cilindro, onde a rosca de injeção atua como um parafuso sem fim transportando o polímero até a extremidade do canhão, onde se localiza o bico de injeção, durante esse processo o material é plastificado. (HARADA; UEKI, 2012)

A fusão ocorre pelo calor proveniente de resistências elétricas e do cisalhamento gerado pelo movimento e pressão entre a rosca e o polímero. Ao atingir a dosagem pré-estabelecida na parte frontal do canhão, a rotação cessa e a rosca atua como um pistão empurrando o polímero pelo bico da injetora de modo a preencher toda a cavidade do molde. (HARADA; UEKI, 2012).

Após o preenchimento total da cavidade o pistão continua exercendo pressão, esta etapa é conhecida como tempo de recalque ou empacotamento, e possui a função de evitar que o material volte em direção ao fuso e também compensar a contração do material proveniente do resfriamento do material no molde. Terminado o processo de recalque, o fuso gira e se afasta para a dosagem do próximo ciclo. (MANRICH, 2013).

De acordo com Manrich (2013) a etapa de resfriamento da peça inicia no momento em que o polímero entra pelos canais do molde e finaliza quando o material atinge a temperatura de desejada para extração, para a qual o material moldado possui rigidez o suficiente para ser extraído sem prejudicar a sua geometria. Como Leães (2008, p.6) demonstra na Figura 1, esta é a etapa que demanda o maior tempo no ciclo de injeção.

Por fim, o molde é aberto e os extratores avançam para soltar a peça do molde, em seguida o molde é fechado e está pronto para iniciar um novo ciclo.

Conforme Harada e Ueki (2012), a unidade de fechamento é responsável por abrir e fechar o molde, aplicar a força necessária para mantê-lo fechado durante a injeção e a movimentar os pinos extratores.

Harada e Ueki (2012) afirmam que devido às altas velocidades, pressões e trocas de calor com as paredes do molde, a estrutura final do polímero sofrerá alterações. Assim, o estado final do produto será uma combinação das propriedades inerentes ao polímero e condições de pressão, velocidade, troca de calor, dentre outros parâmetros do processo submetido durante a conformação.

### **2.2.1 Molde de injeção**

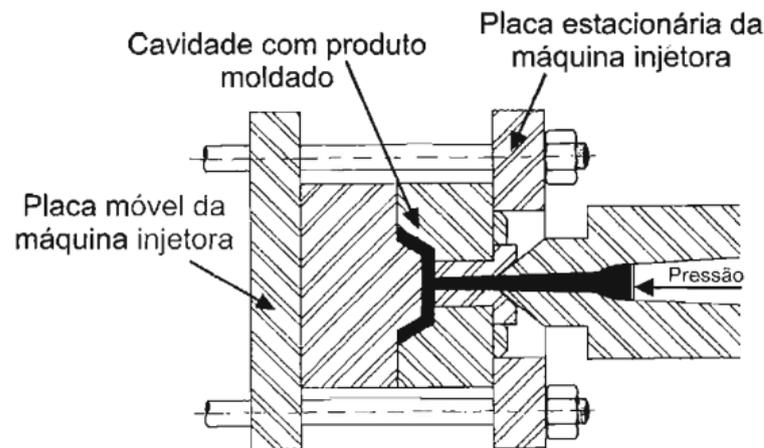
O molde pode ser considerado a parte principal do processo de injeção. Segundo Harada (2004), é o componente que define a geometria final da peça, podendo apresentar diferentes configurações e complexidades em função do tamanho e formato da peça, número de cavidades e o tamanho e capacidade da máquina no qual o molde será utilizado. Como apresentado na Figura 3, o molde é adaptado ao final da unidade de injeção e recebe, em sua cavidade, o polímero fundido.

Manrich (2013) classifica os moldes em três categorias:

1. Convencionais ou com canais frios, podem ser de duas ou três placas;
2. Com canais isolados, podem ser convencionais ou com aquecimento;
3. Com canais quentes, podem ser com distribuidor frio ou quente;

A Figura 3 mostra o molde convencional utilizado na produção de peças de geometria simples, geralmente, possui duas placas: uma fixa e uma móvel. A placa móvel é responsável por abrir e fechar o molde, além de extrair a peça, já a placa fixa é por onde o material é injetado. As placas possuem as cavidades com o formato das peças, canal de injeção, canais de alimentação e distribuição, pinos extratores e canais de resfriamento, como afirma Manrich (2013).

Figura 3 – Molde de injeção



Fonte: Harada (2004)

Harada (2004) salienta que as placas podem conter elementos adicionais na cavidade, denominados de insertos ou postiços, itens que podem ser fabricados de materiais com propriedades mecânicas diferentes do conjunto do molde. Essa estratégia é amplamente utilizada e possui diversas vantagens como menor custo para alteração da geometria do produto moldado e redução do desgaste da cavidade com a utilização de materiais mais resistentes.

## 2.2.2 Parâmetros do processo de injeção

Os parâmetros utilizados no processo de injeção influenciam no resultado da peça final, desta forma, é preciso justá-los caso a caso com base nas características do material, geometria da peça e condições de processo (Harada 2004).

### 2.2.2.1 Temperatura de injeção

No processo de moldagem por injeção de plástico a temperatura de injeção é um parâmetro crítico. Segundo Osswald et al. (2018), é importante controlar cuidadosamente a temperatura de injeção para evitar a degradação do material, contração excessiva e falhas de preenchimento.

A temperatura de injeção também influencia diretamente a viscosidade do material e sua capacidade de fluir adequadamente na cavidade do molde. Assim, com

o aumento da temperatura, a viscosidade do material fundido diminui e, portanto, menor será a pressão necessária para atingir a velocidade de injeção desejada.

#### 2.2.2.2 Temperatura do molde

Segundo Harada (2004), a temperatura do molde pode afetar diretamente a qualidade final da peça, bem como sua precisão e estabilidade dimensional. Moldes com temperaturas próximas a do material injetado, reduzem tensões internas, gerando superfícies mais brilhantes, reduzindo linhas de junção e marcas de fluxo na peça final. Porém, com a utilização de altas temperaturas do molde, há necessidade de um tempo de resfriamento maior para o material solidifique e possa ser extraído do molde, ocasionando maior tempo de ciclo e menor produtividade.

#### 2.2.2.3 Pressão de injeção

A pressão de injeção é um dos fatores mais importantes no processo de injeção de plásticos. De acordo com Harada (2004), a pressão de injeção é responsável por preencher completamente a cavidade do molde com material fundido e o pressurizar contra as paredes a fim de imprimir todos os detalhes na superfície do moldado, garantindo a qualidade da peça final. Esta pressão exercida pela rosca depende de diversos fatores como: tipo de material, tipo de máquina injetora, temperaturas de plastificação do material, tamanho do orifício do bico, desenho do molde, tamanho da entrada, da lubrificação dos grãos, dentre outros fatores.

Pressões insuficientes podem resultar em preenchimento incompleto da cavidade, causando falhas como: marcas de solda, vazios e deformações. Já o excesso pode provocar rebarbas na peça e até impedir a abertura do molde, como complementa Harada e Ueki (2012).

#### 2.2.2.4 Tempo de injeção

De acordo com Harada (2004), o tempo de injeção é definido como o período em que rosca avança e o momento em que a pressão de injeção para de atuar,

resumidamente o tempo que leva para preencher a cavidade do molde com plástico fundido e a solidificação uniforme do material plástico.

#### 2.2.2.5 Rotação da rosca

Segundo Harada (2004), a capacidade de plastificação é controlada, principalmente, pela velocidade de rotação da rosca que gera uma maior produção, ao ganhar mais aceleração. Porém, a alta rotação pode levar a um preenchimento incompleto do molde, aumento de temperatura e bolhas de ar na peça. Enquanto a baixa rotação pode levar a preenchimento incompleto, redução de temperatura e marcas de soldagem.

#### 2.2.2.6 Velocidade de injeção

A velocidade de injeção afeta principalmente a aparência e as propriedades mecânicas das peças moldadas. Altas velocidades proporcionam ciclos mais curtos e menores tensões internas, porém podem gerar uma maior tensão de cisalhamento e aumento da temperatura, o que pode causar problemas como deformação, tensão residual, falhas de preenchimento e também a diminuição da resistência à tração. Por outro lado, a velocidade de injeção muito baixa pode causar formação de marcas de soldagem, peças com baixa densidade e falhas de preenchimento (Harada 2004).

### 2.3 MANUFATURA ADITIVA

Grandes setores da indústria moderna, como eletroeletrônicos e automóveis, são pressionados pela necessidade de introduzir rapidamente novos produtos no mercado, juntamente com grandes expectativas em relação a desempenho e individualização do produto, como afirmam Hoekstra, Leeflang e Wittink (1999).

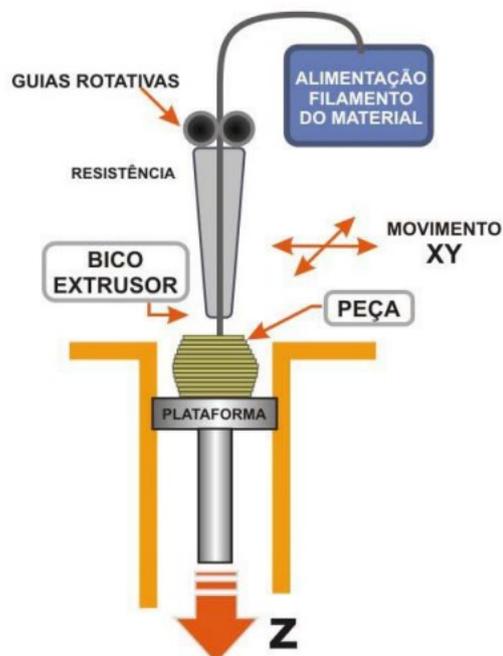
Visando atender esta necessidade, Rajaguru, Duke e Au (2015) apontam aumento no interesse do uso de manufatura aditiva para construção de ferramental rápido. Kovács et al. (2008) define ferramental rápido (RT – rapid tooling), como uma tecnologia que adota técnicas de prototipagem rápida (RP – rapid prototyping) para fabricação para a fabricação direta, ou indiretamente, de ferramental.

Assim, a integração da RP com a moldagem por injeção possibilita que empresas atendam às demandas de desenvolvimento rápido de produtos e reduzam tempo e o custo de fabricação deste tipo de ferramental.

### 2.3.1 Modelagem por deposição fundida (FDM)

A modelagem por deposição fundida, em inglês FDM, Fused Deposition Modeling, é uma tecnologia onde o material entra no estado sólido e por ação do calor gerado por resistências elétricas, é fundido. Após este processo, é extrudado pelo bico extrusor sobre uma mesa. A forma mais comum de funcionamento é o bico extrusor se deslocar no plano horizontal e a mesa se movimentar no eixo vertical dando origem a camadas sobrepostas de espessura adequada formando o objeto pretendido, a Figura 4 esquematiza o processo. Também são construídos suportes para apoio vertical quando a geometria necessita, podendo ser de um segundo material com qualidade inferior (GORNI, 2001).

Figura 4 – Esquemático do processo de FDM



Fonte: PINHEIRO (2009)

Dentro das opções de RT disponíveis no mercado, o FDM tem-se destacado pelo preço competitivo do equipamento. A facilidade na utilização, a variedade de

materiais disponíveis, o baixo custo de manutenção e ser um equipamento compacto são vantagens desta tecnologia. No entanto, Cordeiro (2014) destaca que, o difícil processo de calibração, as linhas visíveis entre camadas e a baixa rigidez em construções sob o eixo vertical são alguns dos pontos negativos deste processo.

## 2.4 MOLDES HÍBRIDOS

Saraiva et al. (1999) explicam que moldes híbridos são descritos como ferramentas que utilizam diferentes materiais e tecnologias para fabricação de moldes de injeção de plástico. Rosato (1995) acrescenta que um molde híbrido pode possuir um inserto confeccionado em resina epóxi, metais leves, borrachas de silicone e polímeros. Os insertos possuem como vantagem a possibilidade de utilização de um material com características específicas, facilidade de substituição e flexibilidade de modificação. Estes podem ser produzidos por diversas técnicas de prototipagem, Rajaguru, Duke e Au (2015) relatam que a busca pela construção de um ferramental de menor custo e tempo de fabricação impulsiona o interesse do uso de manufatura aditiva.

### 2.4.1 Insertos poliméricos

A utilização de moldes híbridos com insertos poliméricos é foco de pesquisas principalmente devido a sua versatilidade, porém Dreschsler e Sacchelli (2017) ressaltam que devido à baixa difusividade térmica do inserto polimérico, a condução de calor para fora do molde é comprometida, resultando em regiões de alta temperatura. Como dito por Jiang et al (2015), a temperatura do molde é um parâmetro importante para determinar as características finais do componente injetado, assim, as regiões de alta temperatura podem causar a deformação do inserto e deformação dos produtos moldados.

Como observado no estudo de Carreira (2021), que avaliou o desempenho e a precisão dimensional dos produtos moldados em insertos fabricados por manufatura aditiva. A utilização do inserto FDM apresentou dificuldade devido a temperatura de transição vítrea do ABS, material utilizado no inserto, originando deformação da superfície próximo do canal de injeção e conduzindo ao aumento da espessura nesta região. Já a utilização do inserto *Polyjet* com resina epóxi com cargas metálicas

apresentou bons resultados para pequenas/médias séries de peças dentro de especificações geométricas.

Os termoplásticos moldados por injeção mantêm uma orientação molecular residual como resultado combinado do alinhamento da cadeia durante o enchimento do molde seguido pelo resfriamento (Viana e Cunha, 1996). Mendible, Rulander e Johnston (2017) acrescentam que as baixas taxas de transferência de calor do inserto promovem um crescimento dos cristais e aumentam a probabilidade de retração do polímero. Porém, em materiais com taxas de cristalização rápidas como o polipropileno e o polietileno de alta densidade este efeito é irrisório e as propriedades mecânicas são semelhantes ao se comparar componentes injetados utilizando insertos metálicos e poliméricos (Tábi et al 2015).

Uma das limitações na moldagem de termoplásticos em insertos poliméricos é a possibilidade de ocorrer afinidade química entre os materiais durante o processo de injeção. Foggiato et al. (2004) analisou o uso de insertos fabricados por FDM no processo de injeção de plástico, utilizando três geometrias diferentes e parâmetros construtivos diferentes, os insertos foram produzidos em ABS, PC e PPSF, nos insertos de ABS foram realizados recobrimentos cerâmicos, metálicos e poliméricos. Com o intuito de também analisar a afinidade entre os materiais, foram utilizados na injeção os materiais PP, PE, POM, PA E ABS. Os resultados obtidos por Foggiato et al. (2004) na utilização de recobrimento nos insertos de ABS não foram positivos, o inserto de PPSF apresentou o melhor resultado por possuir melhores propriedades mecânicas e térmicas, em relação ao ABS, e apresentar menor degradação na injeção de diversos materiais.

Foggiato et al. (2004) salientam que para a escolha do material do inserto e do material a ser injetado deve se considerar principalmente a temperatura de injeção, resistência mecânica e afinidade química entre os materiais. Carreira (2021) acrescenta que ao utilizar materiais com afinidade química ocorre o desgaste adesivo, que é o deslizamento sob pressão entre duas superfícies sólidas, em insertos poliméricos as projeções de superfície são deformadas plasticamente e podem ser unidas nos locais onde se verifica a maior pressão. Deste modo é preciso estabelecer um procedimento de escolha do material a ser injetado e do material do inserto para não possuírem afinidade entre si, uma possibilidade é utilizar o parâmetro de solubilidade de Hildebrand ( $\delta$ ) para defini-los.

O parâmetro de solubilidade de Hildebrand é a medida das energias de interação que mantém as moléculas unidas. Quando os parâmetros de solubilidade de dois materiais são próximos eles tendem a ser solúveis entre si (Brandão, 2010). A Tabela 3 fornece os parâmetros de solubilidade dos polímeros PLA e PP. Para o caso do inserto em PLA com o material injetado PP, pela diferença entre os valores, possivelmente não há afinidade entre os materiais.

Tabela 3 – Parâmetro de solubilidade de Hildebrand.

Polímero	Solubilidade $\delta$ (MPa <sup>1/2</sup> )
PP	16.6
PLA	19.9

Fonte: Vandenburg et. al. (1999) e Domingues, Pereira, Borges (2017)

Bareta (2007) acrescenta que outro parâmetro de grande importância na escolha do material para o inserto é a dilatação linear do material, em seu estudo utilizando insertos de resina epóxi, alumínio e Zamak, comparados ao inserto fabricado com P20, a dilatação do inserto de Zamak ocasionou a obstrução da saída de gases, gerando peças incompletas. Bareta (2007) também comparou as propriedades mecânicas dos produtos moldados pelos diferentes insertos, obtidas pelo ensaio de tração e impacto, os produtos moldados no inserto de resina obtiveram resultados inferiores ao injetado em metálicos. A análise dimensional apresentou alteração maior que a esperada somente na espessura dos produtos.

O design do produto e a estrutura do molde são fatores a ter atenção de modo a garantir que o desgaste permaneça em valores toleráveis durante a vida útil. Martinho (2010) aponta que em moldes híbridos as dimensões finais não estão apenas relacionadas com a contração, sendo que a deformação ocorrida em zonas moldantes não metálicas é fato a ser considerado, fruto da pressão inerente ao próprio processo. Devido a degradação térmica há uma tendência para haver remoção de partículas de material próximo do canal de injeção (Martinho 2010).

Pontes et al. (2010) utilizou molde híbrido com geometria complexa para a injeção de PP com inserto de resina epóxi, onde apresentou dificuldade na extração da peça e a deformação do inserto iniciou no 14º ciclo nas nervuras, saliências e bucha de injeção, assim o autor não considera adequado a utilização de insertos em resina epóxi para injeção de geometria complexa.

## 2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os programas de simulação CAE disponíveis atualmente possuem a capacidade de realizar simulações numéricas das diversas variáveis envolvidas no processo de injeção. Isso permite que sejam apresentados resultados que antecipem possíveis problemas ainda na fase de desenvolvimento do molde e do produto, evitando ajustes posteriores e otimizando o tempo necessário para sua confecção.

A utilização de simulações CAE permitem testar diferentes materiais e parâmetros de processamento, possibilitando melhorias como: otimização da localização das entradas de injeção, redução do tempo de ciclo de injeção, previsão de empenamento e prováveis soluções, localização e controle de linhas de solda, redução do tempo de desenvolvimento do molde, otimização de circuitos de resfriamento, dentre outros. (HARADA; UEKI, 2012).

Uma das ferramentas CAE disponíveis para o processo de injeção é o Moldflow Plastics Insight (MPI), uma ferramenta desenvolvida pela Moldflow Corporation, em 1974, na Austrália (WEST, 2018). A principal função desta ferramenta é a análise detalhada da injeção de peças plásticas auxiliando na determinação das condições ótimas de processo e detectando possíveis falhas de projeto (WEST, 2018).

Para preparar o modelo, o MPI gera uma malha de elementos finitos a partir de um modelo CAD. Em seguida, é necessário fornecer os parâmetros de injeção ou utilizar os pré-determinados pelo programa. Com todos os dados fornecidos, a rotina pode ser executada e os resultados podem ser analisados.

Sacchelli et al., (2017) afirma que as ferramentas CAE conseguem reproduzir o comportamento do processo de injeção ao se variar a pressão e temperatura com pouco desvios, porém, podem apresentar uma deficiência maior quanto aos resultados dos fenômenos viscoelásticos.

Devido à necessidade de controle de temperatura e pressão a utilização de simulação CAE apresenta grande importância na definição de parâmetros iniciais, refinamento de parâmetros de injeção e análise de resultados como apontado nos trabalhos de Dreschsler e Sacchelli (2017), Bareta (2007), Carreira e Pontes et al. (2010).

Boden et al. (2018) aponta a similaridade entre o comportamento térmico e mecânico do molde híbrido simulado com o obtido em seu estudo, principalmente a influência dos pinos extratores na troca de calor.

## 2.6 FIBRA DE CARBONO

A indústria, em suas diversas áreas, utiliza diversos tipos de materiais para moldar suas estruturas em busca de características adicionais específicas. A fibra de carbono é uma fibra sintética, que combinada com outros materiais agrega resistência ao esforço mecânico e térmico conforme, Silva e Gianini (2019) afirmam.

As fibras de carbono possuem grande rigidez, exibindo múltiplas características físicas e mecânicas, também possuem boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (CALLISTER, 2002).

A adição de fibras de carbono aos materiais utilizados no processo de FDM visa a melhoria das propriedades mecânicas, tais como resistência à tração e módulo de elasticidade, propriedades necessárias para atingir uma gama maior de componentes capazes de desempenhar funções estruturais (Duty et al., 2017). A introdução da fibra de carbono aumenta condutividade térmica do material depositado, diminuindo o gradiente de temperatura, assim a temperatura se mantém naturalmente mais estável durante o processo de deposição (Love et. al 2014).

## 3 MATERIAIS E MÉTODO

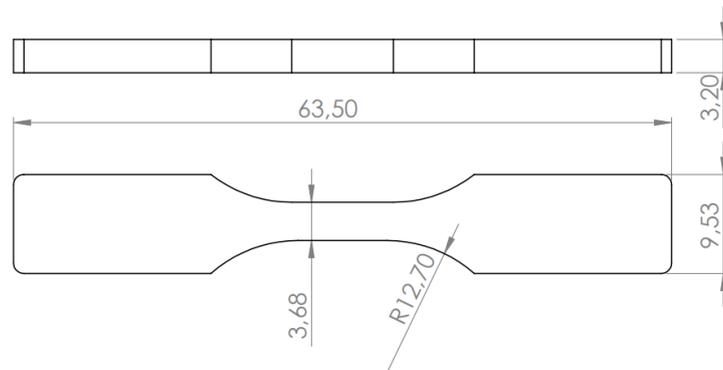
No presente capítulo, é apresentada a descrição do desenvolvimento experimental do inserto híbrido, qualidade das peças produzidas, sua definição e planejamento para chegar aos resultados dos testes realizados.

### 3.1 GEOMETRIA DO PRODUTO

Visando analisar a reologia e influência do inserto nas propriedades da peça injetada foram definidos dois corpos de prova com geometrias diferentes que permitissem tal análise. As dimensões dos corpos de prova foram baseadas nas

normas da ASTM, sendo a na norma ASTM D638 para o corpo de prova de tração tipo V da Figura 5.

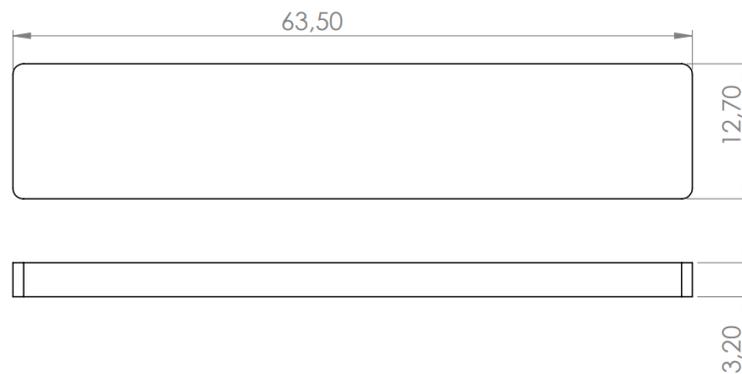
Figura 5 – Corpo de prova tração



Fonte: Autora (2023)

E a norma ASTM D256, para o corpo de prova de impacto (Figura 6).

Figura 6 – Corpo de prova impacto

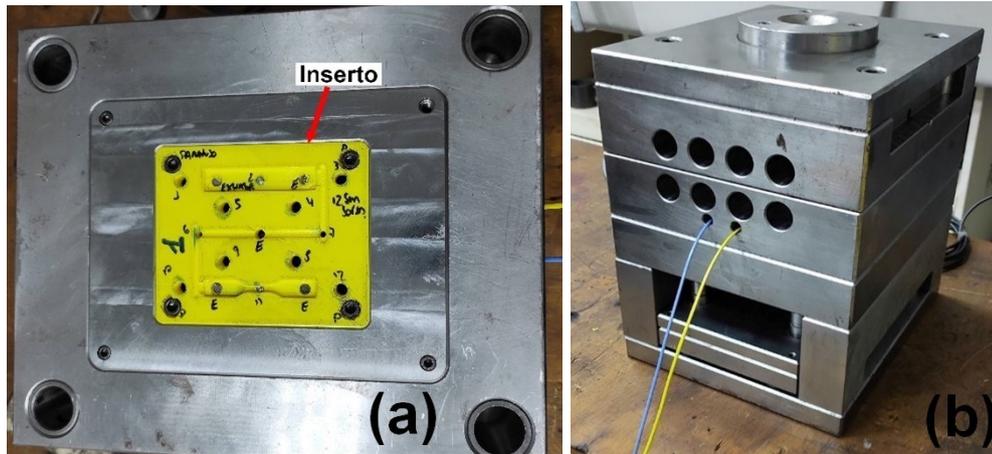


Fonte: Autora (2023)

### 3.2 MOLDE

O molde de injeção utilizado neste experimento possui duas placas com a característica de intercambialidade da cavidade e do inserto moldante, podendo ser realizada a troca rapidamente sem necessidade de retirar o molde da injetora. Na placa móvel foi empregado o inserto fabricado por FDM, enquanto na placa foi utilizado um inserto de aço 1045, como ilustrado na Figura 7 (a). O molde completo está ilustrado na Figura 7 (b).

Figura 7 – Molde: (a) Montagem do inserto; (b) Molde completo

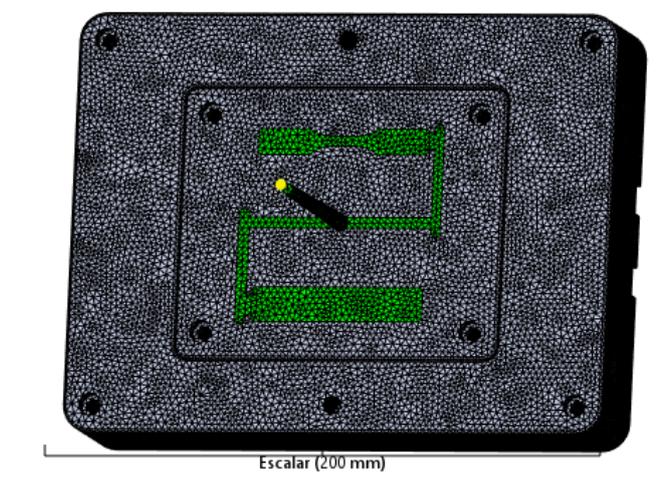


Fonte: Autora (2023)

### 3.4 SIMULAÇÃO DA MOLDAGEM POR INJEÇÃO COM MOLDE HÍBRIDO

Visando otimizar a geometria dos canais de alimentação e o comportamento dos insertos durante o processo de moldagem por injeção foi realizada a simulação CAE no MoldFlow. Na simulação foram consideradas a placa porta inserto, inserto polimérico e o produto, a malha utilizada foi do tipo 3D com 35913 elementos tetraédricos no produto, inserto e porta inserto como mostrado na Figura 8. O algoritmo de solução escolhido foi o de arrefecimento (FEM), enchimento, compactação e empenamento, sem utilização de canais de refrigeração, indicando somente a temperatura inicial do molde e inserto como 25 °C para ser compatível com o experimento real.

Figura 8 – Malha 3D



Fonte: Autora (2023)

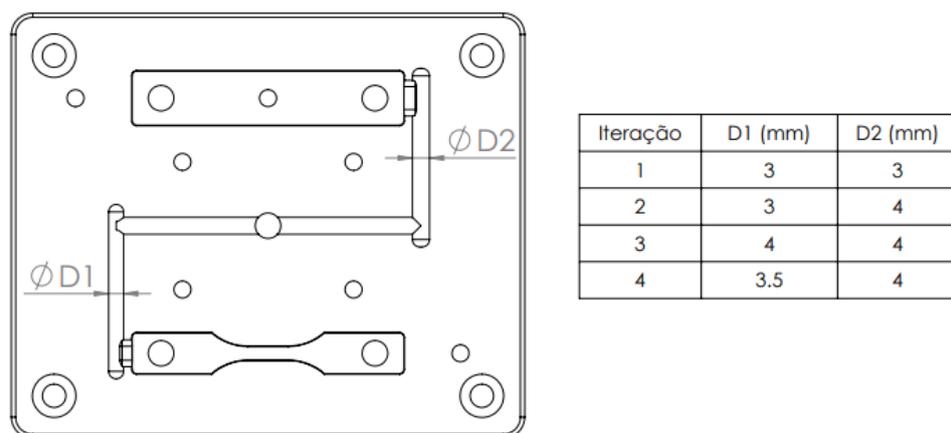
Na placa porta inserto foi considerado o material sendo o aço 1045, que possui suas características na biblioteca do MoldFlow. Para o inserto polimérico foi necessário adicionar o material PLA manualmente, conforme apresentado na Tabela 1. O material utilizado na simulação e na moldagem por injeção foi o PP H105, da fornecedora Braskem, pois este material estava disposto no laboratório e possui seus dados na biblioteca no MoldFlow.

### 3.4.1 Canais de injeção

Segundo Rosato (1995), o balanceamento dos canais em moldes de injeção de plástico é um processo crucial para alcançar uma distribuição uniforme do material fundido nas cavidades do molde. Isso é fundamental para evitar problemas como pressão desigual, fluxo desigual e preenchimento inadequado das cavidades.

Como o inserto possui dois produtos distintos, não foi possível utilizar a mesma geometria nos canais de injeção. Visando garantir um fluxo uniforme de material plástico foram realizadas simulações de preenchimento em que foram testadas quatro variações de diâmetros dos canais de injeção buscando o melhor balanceamento, Figura 9.

Figura 9 – Simulação canais de injeção



Fonte: Autora (2023)

### 3.5 FABRICAÇÃO DOS INSERTOS POR FDM

Para o experimento foram utilizados 4 tipos de insertos, construídos utilizando a metodologia RT por FDM. Os insertos I0, A e B foram construídos com o equipamento instalado no Laboratório de inovação e desenvolvimento de produtos e processos, na UFSC Joinville, e alimentada com filamento de PLA. O inserto C foi fornecido pela empresa 3D Slim que utilizou o filamento PLA *Premium Carbon Fiber*, material que agrega ao PLA 20% de fibra de carbono. Na Tabela 4 são apresentados parâmetros principais de impressão utilizados nos insertos I0, A e B, os demais parâmetros estão disponíveis no Apêndice A.

Tabela 4 – Parâmetros de impressão dos insertos

Diâmetro do filamento (mm)	1,75
Espessura de camada (mm)	0,3
Velocidade de impressão (mm/s)	35
Temperatura da mesa aquecida (°C)	60

Fonte: Autora (2023)

Para a manufatura dos insertos foram consideradas as seguintes características para cada inserto:

- Inserto I0: Porcentagem de preenchimento das camadas intermediárias de 50% visando reduzir custo devido ao menor tempo de impressão e material utilizado;
- Inserto A: Porcentagem de preenchimento das camadas intermediárias de 100%;
- Inserto B: Além de 100% de preenchimento foi utilizado ângulo de saída para auxiliar na extração e preenchimento parcial entre sensor e cavidade do corpo de ensaio de tração;
- Inserto C: Os mesmos 100% de preenchimento e preenchimento parcial entre sensor e cavidade do corpo de ensaio de tração.

### 3.6 PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO COM MOLDE HÍBRIDO

As injeções foram realizadas com a utilização da máquina Arburg Allrounder 320 C Golden edition da Figura 10, localizada no Laboratório de Manufatura da UFSC Joinville. Os parâmetros de processo de injeção utilizados na máquina foram extraídos da simulação do MoldFlow e utilizados na injeção I0, no entanto, é importante ressaltar que houve a necessidade de realizar o ajuste da temperatura de injeção e curso de dosagem para as demais injeções.

Figura 10 – Máquina injetora



Fonte: Autora (2023)

Foram realizados quatro experimentos de injeção onde o número de ciclos realizados em cada inserto está apresentado na Tabela 5. Os produtos foram identificados conforme a ordem de fabricação e agrupados conforme o tipo de inserto utilizado.

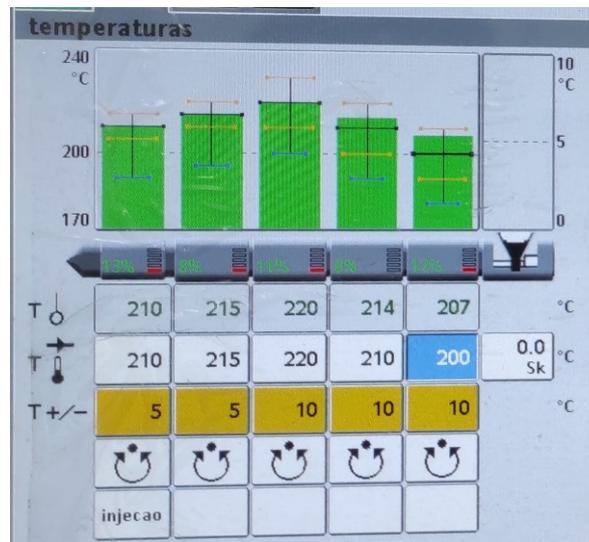
Tabela 5 – Ciclos de injeção

<b>Inserto</b>	<b>Número de ciclos</b>
<b>I0</b>	1
<b>IA</b>	40
<b>IB</b>	50
<b>IC</b>	50

Fonte: Autora (2023)

As temperaturas utilizadas nas resistências do cilindro para que obtivesse a temperatura de massa para a injeção são apresentadas na Figura 11. Os parâmetros utilizados durante o processo de injeção estão apresentados no Quadro 1.

Figura 11 – Temperaturas das resistências do cilindro de plastificação



Fonte: Autora (2023)

Quadro 1 – Parâmetros do processo

Descrição	I0	IA			IB	IC
<b>Produto</b>	<b>1</b>	<b>1 a 11</b>	<b>12 a 16</b>	<b>17 a 40</b>	<b>1 a 50</b>	<b>1 a 50</b>
<b>Temperatura de massa (C°)</b>	230	185	210	210	210	210
<b>Pressão de injeção (Bar)</b>	194	230	1000	230	230	230
<b>Tempo médio de ciclo</b>	-	57	57	57	50	49
<b>Curso de dosagem (mm)</b>	11	11	22	22	22	22
<b>pressão de recalque (Mpa)</b>	150	150	150	150	150	150
<b>Tempo de recalque (s)</b>	10	10	10	10	10	10
<b>Tempo de injeção (s)</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Tempo de resfriamento (s)</b>	15	15	15	15	15	15

Fonte: Autora (2023)

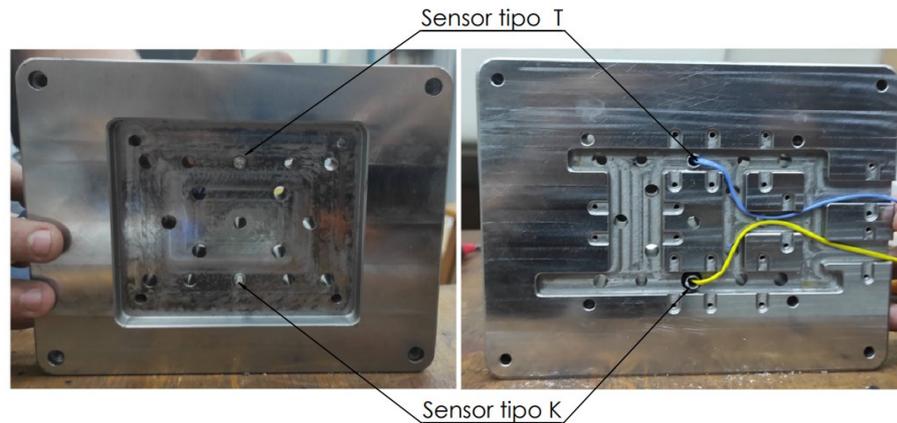
### 3.7 ANÁLISE DOS INSERTOS E PRODUTOS

As análises tiveram como base a avaliação das dimensões, visual e propriedades mecânicas para definição das características resultantes da injeção em moldes híbridos.

O acompanhamento da temperatura no inserto foi realizado utilizando dois sensores de temperatura e um termômetro a laser. Os sensores de temperatura tipo

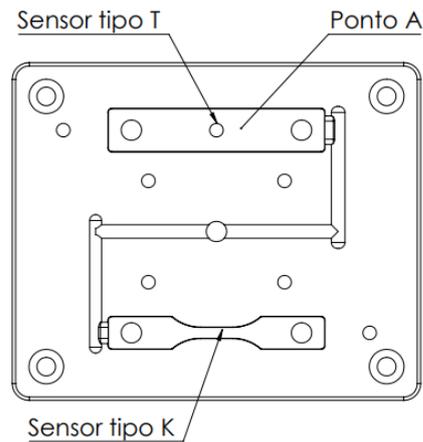
K e T foram dispostos no centro de cada corpo de prova e fixados na cavidade, Figura 12, o termômetro a laser foi utilizado para adquirir os dados no ponto A, ambos destacados na Figura 13. Para a aquisição de dados de temperatura foi utilizado o sistema PMX da HBM, e o módulo de aquisição de dados da National Instruments, Figura 14, ambos utilizaram a frequência de aquisição de dados de 5 Hz.

Figura 12 – Cavidade



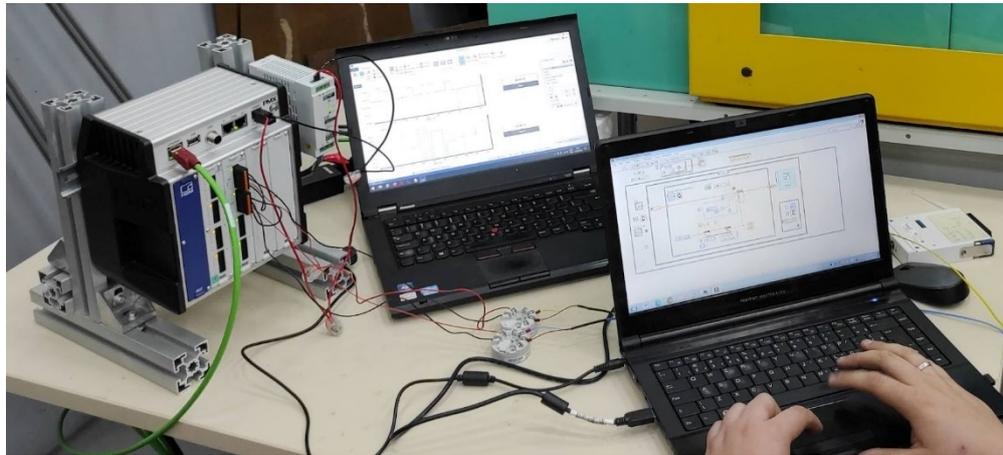
Fonte: Autora (2023)

Figura 13 – Posicionamentos dos sensores



Fonte: Autora (2023)

Figura 14 – Central de aquisição de dados

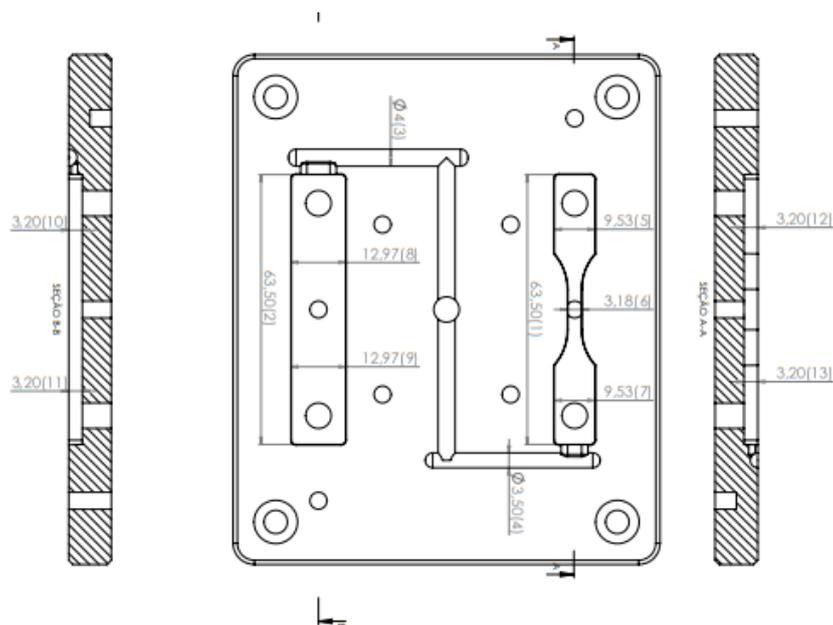


Fonte: Autora (2023)

Durante o processo de moldagem por injeção os produtos foram identificados conforme a ordem de fabricação e o tipo de inserto utilizado. Após a finalização desta etapa, as amostras dos produtos foram separadas para avaliação, sendo selecionadas as peças de número 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50.

Os produtos selecionados foram analisados visualmente e 13 dimensões foram mensuradas, Figura 15, o resultado obtido foi comparado com o projeto CAD com o intuito de analisar as variações.

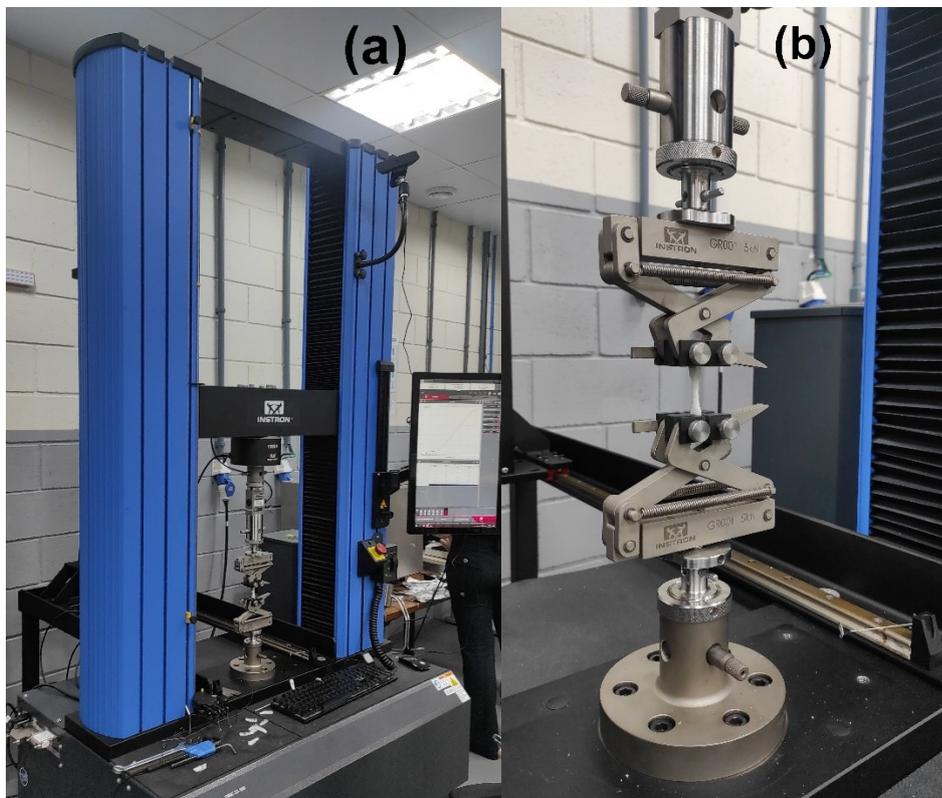
Figura 15 – Pontos de medição do produto injetado



Fonte: Autora (2023)

Análise qualitativa foi realizada para definir as características superficiais encontradas nos insertos após cada processo de fabricação. Para a análise das propriedades mecânicas dos produtos foi utilizado a máquina de tração INSTRON EMIC 23-100, demonstrada na Figura 16(a), com a célula de carga de 2kN, pinça de 5kN, Figura 16(b), e velocidade de 5mm/min. Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM D638-22.

Figura 16 – Ensaio de tração: (a) Máquina de tração; (b) Pinça



Fonte: Autora (2023)

Também foi realizado teste de impacto Izod com o equipamento de teste de impacto para não metálicos da fabricante Equilam, com entalhe de profundidade 3 mm e pêndulo de 10,93 Joules, como mostra a Figura 17, o teste foi realizado conforme a norma ASTM D256. Ambos os equipamentos utilizados para as análises mecânicas estão disponíveis no Laboratório de Ensino de Materiais - LeMat da UFSC.

Figura 17 – Equipamento para teste de impacto



Fonte: Autora (2023)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises estão baseadas nas ferramentas utilizadas na construção do presente trabalho e as discussões foram divididas em dois tópicos, sendo o primeiro tratando dos insertos e o segundo dos produtos moldados.

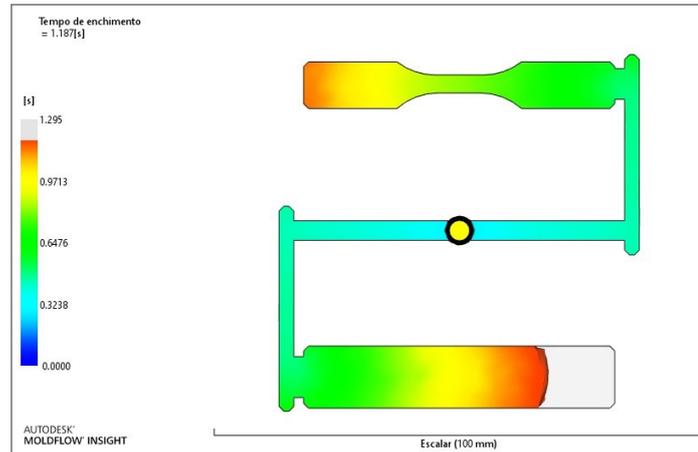
Visando facilitar a diferenciação dos experimentos, os insertos foram denominados seguindo a ordem de execução sendo o inserto I0, inserto A, inserto B e inserto C. Os produtos moldados foram identificados seguindo o inserto utilizado no processo e a ordem de produção.

### 4.1 ANÁLISE DOS INSERTOS

Os resultados de preenchimento da simulação de injeção realizada no MoldFlow permitiram definir a geometria final do inserto garantindo o balanceamento entre os produtos, foi definido formato do canal de injeção como semicircular e realizadas 4 simulações variado D1 e D2, como apresentados na metodologia, Figura

11, onde D1 alimenta o corpo de prova de tração e D2 alimenta o corpo de prova de impacto. Primeiramente foi simulado os dois canais iguais de  $\varnothing 3$ , porém os corpos de prova apresentavam o desbalanceamento de 8,3%, Figura 18.

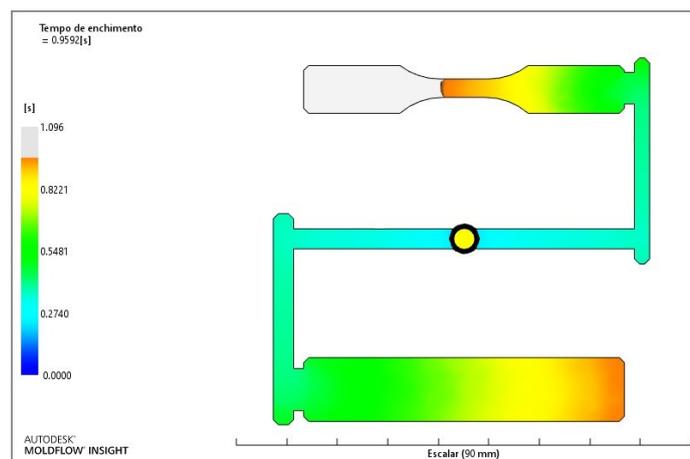
Figura 18 – Preenchimento D1 e D2  $\varnothing 3$  mm



Fonte: Autora (2023)

Na segunda simulação o diâmetro do canal que alimenta o corpo de prova de tração foi ampliado para 4, Figura 19, o tempo total de injeção foi reduzido, porém, o corpo de prova de tração finalizou o preenchimento previamente apresentando o desbalanceamento de 12,5%.

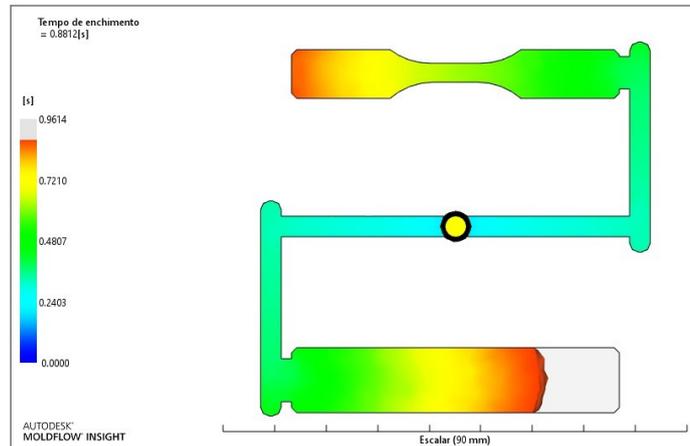
Figura 19 – Preenchimento D1=3 mm e D2= 4 mm



Fonte: Autora (2023)

Na simulação seguinte os canais foram igualados com o diâmetro de 4 mm, Figura 20, o tempo de preenchimento total foi 25,7% menor que a primeira simulação, porém ocorreu aproximadamente mesmo desbalanceamento.

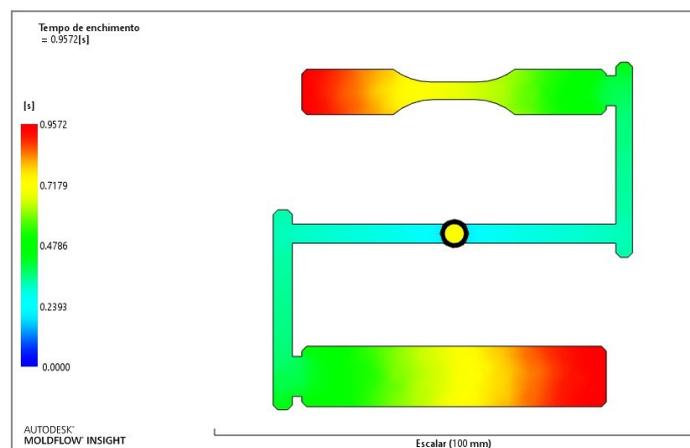
Figura 20 – Preenchimento D1 e D2 Ø4 mm



Fonte: Autora (2023)

Última simulação foi realizada mantendo D2 e reduzindo D1 para 3,5 mm, Figura 21, onde o tempo de preenchimento total foi 8,62% maior que a simulação anterior, porém o balanceamento entre as peças foi anulado sendo definido como a geometria a ser utilizada nos insertos.

Figura 21 – Preenchimento D1=3,5 e D2=4

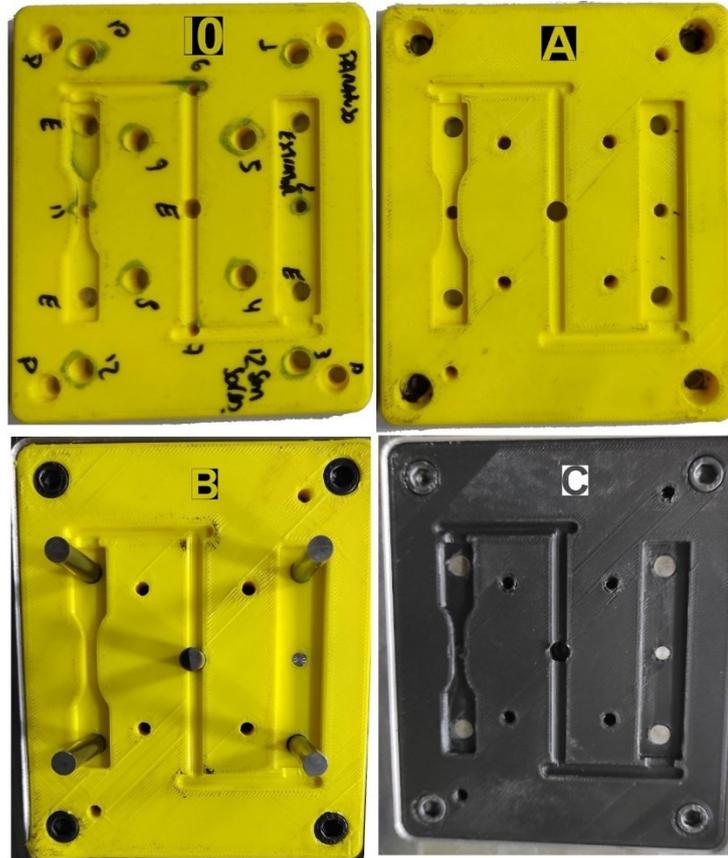


Fonte: Autora (2023)

Os insertos fabricados pelo método FDM foram analisados visualmente identificando características superficiais, como fica aparente na Figura 22 os insertos

possuíram uma superfície levemente ondulada em formato de malha proveniente do processo FDM.

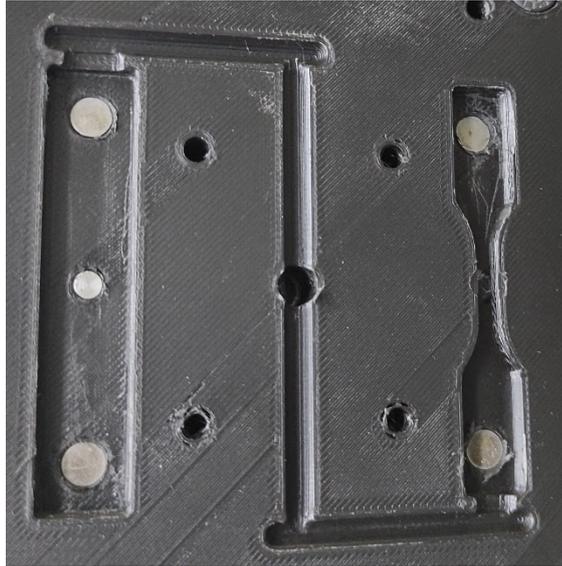
Figura 22 – Inseto I0, Inseto A, Inseto B e Inseto C antes do processo de injeção



Fonte: Autora (2023)

O inserto C, que possui adição de fibra de carbono, apresentou redução de massa de 8% comparado ao inserto B, outro ponto analisado foi a qualidade superficial dos corpos de prova, que está ligada diretamente a qualidade do produto moldado, os insertos 0, A e B apresentaram boa qualidade superficial, porém o inserto C apresentou mais irregularidades em sua superfície após o processo de FDM, como apresentado na Figura 23.

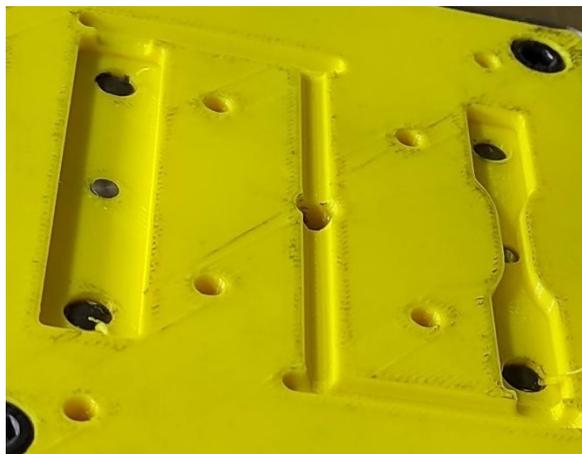
Figura 23– Inseto C após FDM



Fonte: Autora (2023)

Os furos passantes referentes aos sensores, extratores e pino de retorno possuíram leves rebarbas e seus diâmetros estavam levemente menores do que a especificação do CAD devido à contração do PLA após sua impressão, dessa forma foi necessário ajustar os furos com material abrasivo. Os furos dos pinos extratores mesmo realizando o ajuste nos primeiros testes de avanço e recuo formavam rebarbas nos insertos após montagem no molde, como podemos visualizar na Figura 24.

Figura 24 – Rebarba



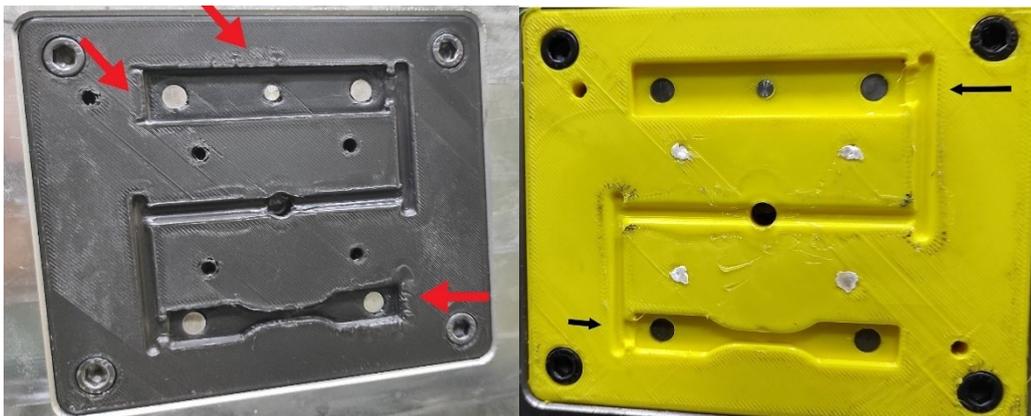
Fonte: Autora (2023)

Para garantir a vedação durante o processo de injeção, o molde foi aberto e fechado diversas vezes simulando o processo de injeção ajustando o inserto no molde com a força de fechamento.

O inserto C fabricado com PLA+20% fibra de carbono apresentou a espessura 0,4 mm menor que o projetado, possivelmente devido à contração do material, ocasionando vazamento e consequentemente rebarbas nos produtos moldados, como fica aparente na Figura 25(a).

O inserto B também apresentou vazamento no primeiro ciclo do processo afetando os canais e os pontos de entrada do material nos corpos de provas, porém não apresentou vazamentos nos ciclos seguintes, Figura 25(b) apresenta o inserto B após o primeiro ciclo do processo.

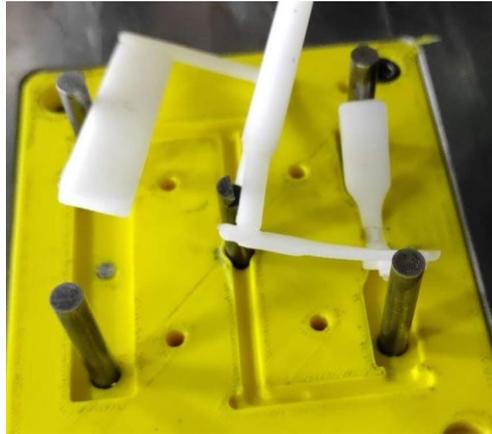
Figura 25 – Insertos após primeiro ciclo do processo: (a) Inserto C; (b) Inserto B



Fonte: Autora (2023)

Uma observação relevante é o fato de os produtos moldados não serem totalmente ejetados pelos extratores, com isso necessitando de uma operação manual entre ciclos para retirada do produto que ficava preso no centro do corpo de prova de tração onde estava localizado um sensor no inserto A, Figura 26.

Figura 26 – Extração do produto no inserto A

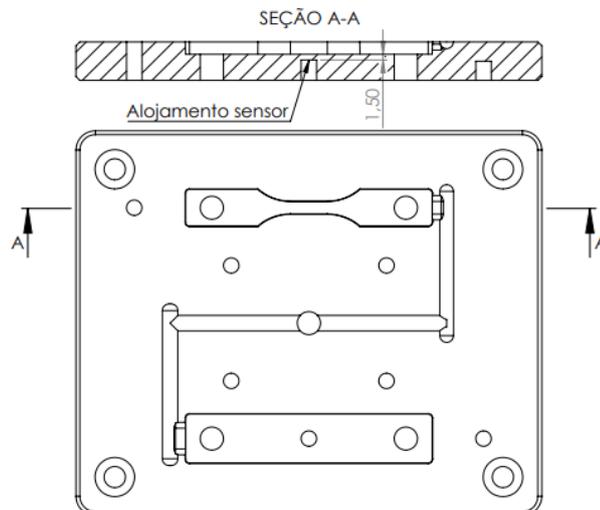


Fonte: Autora (2023)

Como forma de tentar contornar o problema, o projeto CAD dos Insertos B e C foi alterado para que o sensor de temperatura não tivesse contato com o material injetado e a superfície do inserto ficasse regular nesta área, assim o sensor foi alojado no inserto como apresentado na Figura 27.

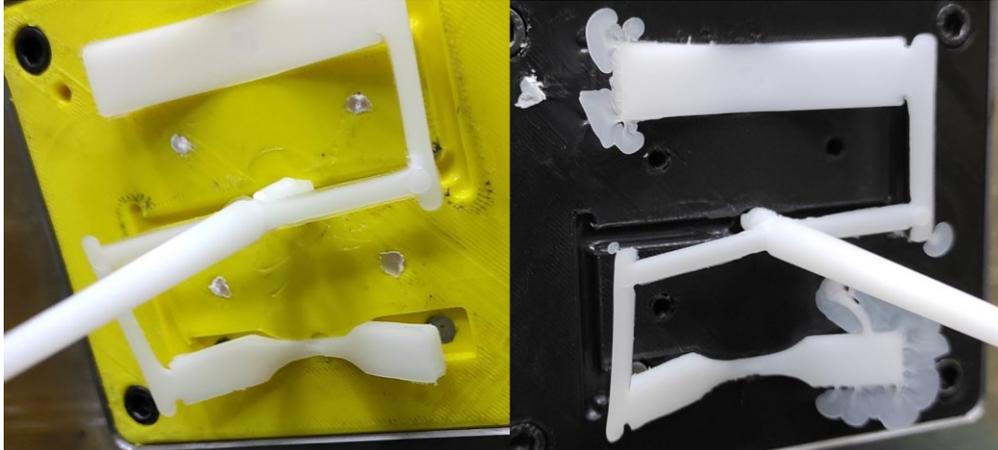
No inserto B foi utilizado ângulo de saída, seguindo as recomendações da ASTM, para facilitar a extração, porém não surtiu efeito e o problema persistiu nos insertos B e C, Figura 28. O corpo de prova de impacto apresentava dificuldade de extração da parte central com o aumento da temperatura do inserto, mostrando a influência da dilatação do inserto no processo de extração da peça.

Figura 27 – Sensor tipo K alojado



Fonte: Autora (2023)

Figura 28 – Dificuldade extração Inserto B e C



Fonte: Autora (2023)

O processo de moldagem com o Inserto 0 foi o primeiro a ser realizado com o objetivo de testar os parâmetros de injeção indicados pela simulação CAE, ajustá-los para a melhor performance do processo de injeção e assim iniciar os processos com os insertos A, B e C com os parâmetros definidos. Porém, no primeiro ciclo de injeção o material não percorreu os canais, infiltrando no inserto impossibilitando novos ciclos com o mesmo, na Figura 29 pode-se observar que o material entra pela bucha de injeção atravessa a camada superficial do inserto e infiltra em seu interior, este fato ocorreu principalmente devido ao percentual de preenchimento do inserto que gerou uma fina camada de material na superfície, que se fundiu ao entrar em contato com o material injetado em uma temperatura acima da sua temperatura de fusão.

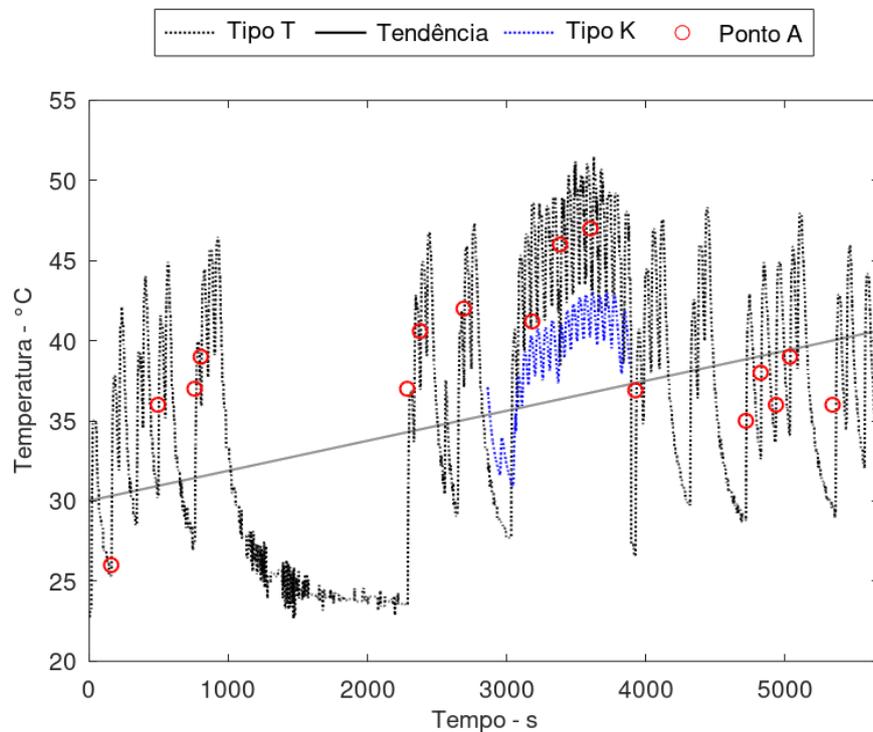
Figura 29 – Inserto I0 após processo de moldagem



Fonte: Autora (2023)

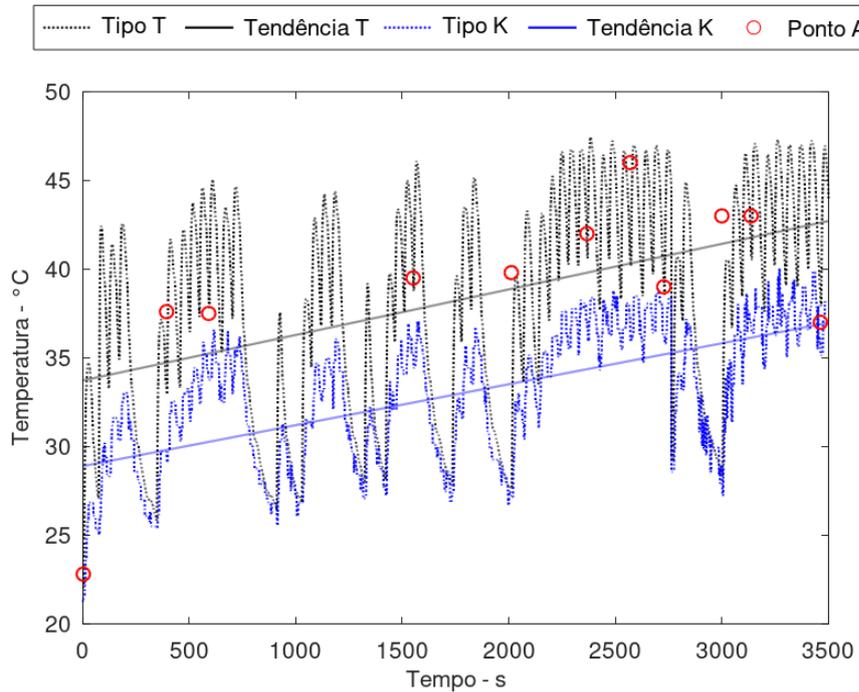
Durante o experimento do Inseto A aconteceram problemas na utilização do programa que afetaram a aquisição dos dados de temperatura, no processo do inserto B os dados foram obtidos parcialmente. No entanto, para o Inseto C esses pontos foram corrigidos, ressaltando que o sensor tipo K não estava em contato com o material injetado. Os dados obtidos pelo termômetro a laser no ponto A também são apresentados na Figura 30 e Figura 31 e mostram a evolução da temperatura nos insertos B e C.

Figura 30 – Análise térmica do ciclo de injeção sobre o inserto B



Fonte: Autora (2023)

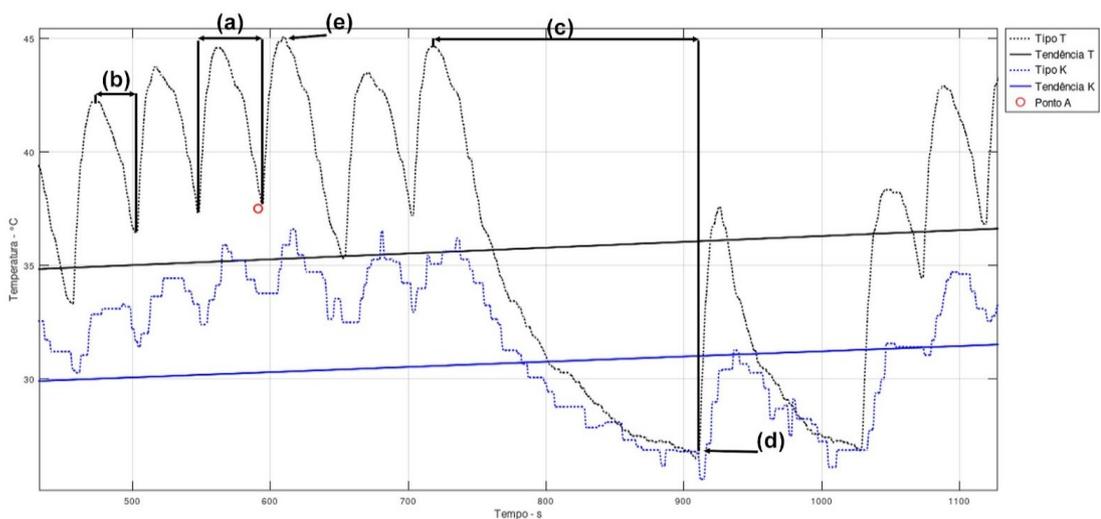
Figura 31 – Análise térmica do ciclo de injeção sobre o inserto C



Fonte: Autora (2023)

A Figura 32 apresenta uma área ampliada da Figura 31, onde pode-se observar as amplitudes térmicas, onde representam: tempo total de ciclo de injeção (a); tempo do ciclo de resfriamento (b) (c); temperatura ambiente (d) e temperatura máxima do inserto no momento da injeção (e).

Figura 32 – Detalhes da análise térmica do ciclo de injeção sobre o inserto C



Fonte: Autora (2023)

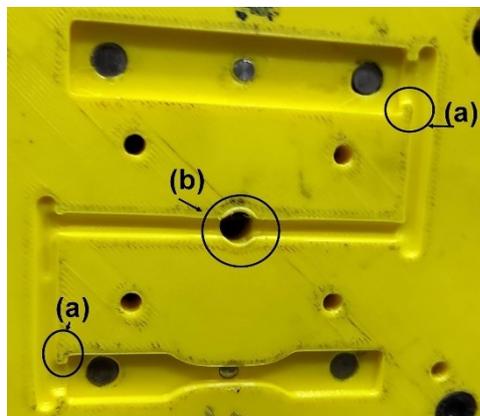
Ao realizar uma pausa no processo de injeção, o tempo de resfriamento (c) foi maior, assim os sensores T e K atingem a temperatura de estabilização térmica (d). O aumento do tempo de ciclo de resfriamento seria uma solução viável para estabilizar a temperatura do inserto.

Durante os processos de moldagem, buscando a menor deformação dos insertos pelo escoamento do material injetado acima da  $T_g$  do inserto, a temperatura de massa utilizada foi  $20^\circ\text{C}$  abaixo da temperatura recomendada favorecendo a solidificação do material na bucha de injeção sendo necessário pausar o processo para a desobstrução da bucha de injeção, ocasionando maior tempo de refrigeração do inserto durante as pausas.

Pode-se constatar a partir dos dados das Figuras 28 e 29, que a temperatura da cavidade entre ciclos possui uma tendência crescente com decorrer dos experimentos e como esperado a temperatura no sensor tipo T, que está na face do inserto, é mais elevada. Os valores de temperatura obtidos pelo termômetro laser na face do inserto se aproximam dos valores apresentados no sensor tipo K, validando o seu uso. A temperatura máxima na face do inserto B após dez ciclos contínuos foi de  $51,2^\circ\text{C}$ , no inserto C após 8 ciclos contínuos a temperatura máxima foi de  $47,4^\circ\text{C}$  ambas as temperaturas abaixo da temperatura de transição vítrea do PLA.

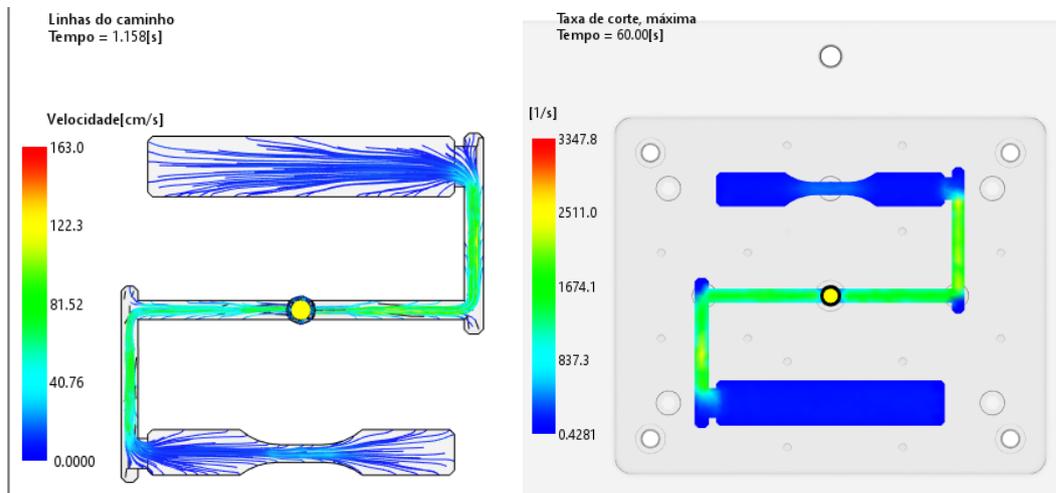
Os insertos se degradaram com o avanço dos ciclos, iniciando pelo canal de injeção (b) e ponto de entrada do lado interno dos corpos de prova (a), onde as áreas (a) e (b) são destacadas na Figura 33, segundo a simulação são regiões com maior velocidade do material injetado, Figura 34(a) e taxa de cisalhamento Figura 34(b).

Figura 33 – Deformação inserto A



Fonte: Autora (2023)

Figura 34 – Simulação CAE: (a) Velocidade de injeção; (b) Taxa de cisalhamento máxima



Fonte: Autora (2023)

Um ponto a se observar nos insertos A, B e C é a falha que ocorreu na parede de ligação do canal de injeção com a cavidade das peças, onde o material do canal de injeção devido ao cisalhamento com o material injetado se deslocou para os corpos de prova, Figura 35.

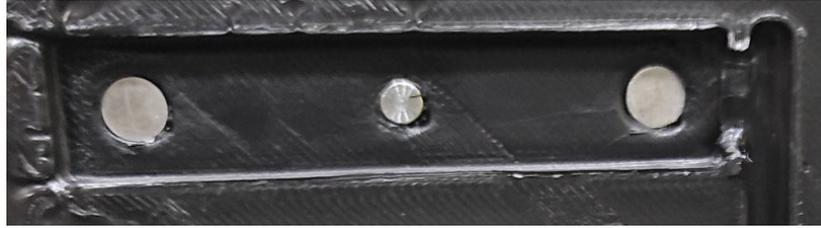
Figura 35 – Deformação da entrada dos corpos de prova



Fonte: Autora (2023)

Apesar de a temperatura do inserto não ultrapassar a transição vítrea, o contacto do polímero injetado com os pinos extratores e sensores pode aumentar a sua temperatura, visto que ocorre maior transferência de calor, aquecendo a região do inserto próxima ao pino gerando deformações na região, Figura 34, fato que Boden et al. (2018) também observou na utilização de inserto de PLA. Também pode-se observar na Figura 36, o espaçamento entre os filetes da camada superficial do inserto devido a deformação da camada superficial do inserto.

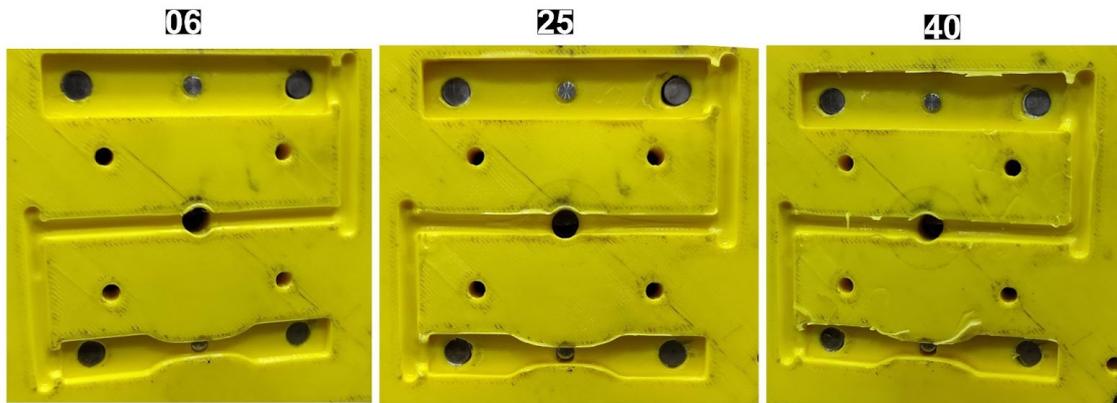
Figura 36 – Impacto do sensor e pinos de extração no inserto C



Fonte: Autora (2023)

No processo de injeção utilizando o inserto 1, pode-se observar o desgaste prematuro devido a com a realização de cinco ciclos de moldagem utilizando a pressão de injeção cinco vezes maior que a recomendada. Os insertos B e C apresentaram desgastes similares em seu interior, porém a parte externa do inserto C apresentou maior deformação devido ao vazamento de material. Figura 37, Figura 38 e Figura 39 apresentam os insertos no início, meio e final do processo de injeção realizado nos mesmos, os índices representam o número do ciclo de moldagem.

Figura 37 – Fases do processo de moldagem inserto A



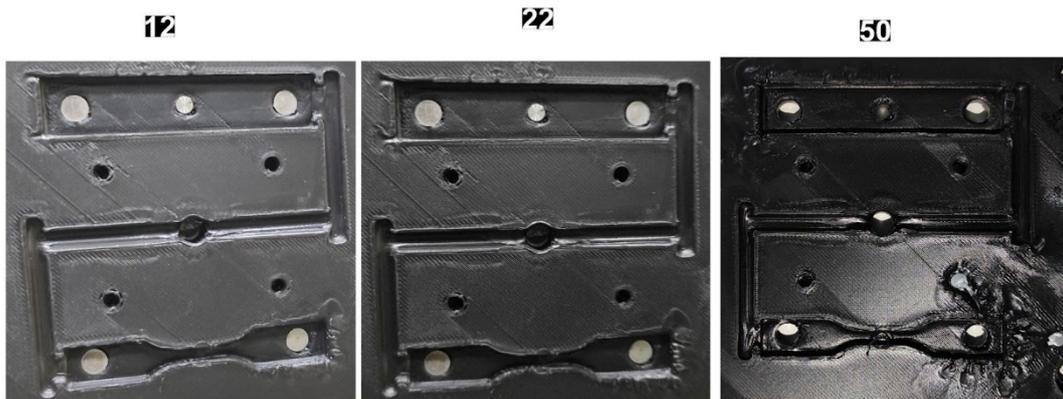
Fonte: Autora (2023)

Figura 38 – Fases do processo de moldagem inserto B



Fonte: Autora (2023)

Figura 39 – Fases do processo de moldagem inserto C



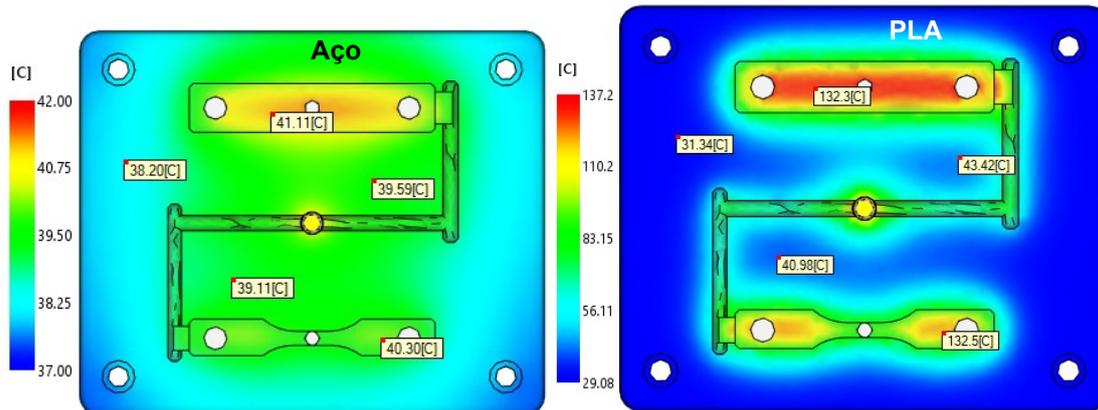
Fonte: Autora (2023)

Observou-se que após o processo de moldagem os canais dos insertos que entraram em contato com o material injetado ficaram com a superfície brilhosa, indicando que a superfície do inserto foi fundida gerando a superfície plana, a face inferior das cavidades dos corpos de prova não apresentou superfície brilhosa, porém apresentaram deformação uniforme na parte central e retração nas arestas. As superfícies laterais dos corpos de prova apresentaram espaçamento entre os filetes, principalmente no inserto C.

A Figura 40 apresenta a comparação da simulação CAE de insertos de aço e PLA, com ela é possível verificar que o inserto de aço apresenta uma temperatura média menor que o inserto de PLA devido a condutividade térmica do metal ser maior que a do polímero. Na Figura 41 é apresentado a imagem obtida por meio de câmera térmica durante o processo de injeção com o inserto C, nota-se que o padrão de

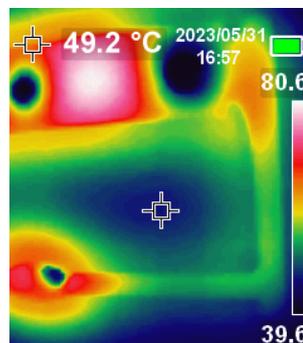
distribuição térmica é similar ao padrão simulado de PLA sem aditivo de carbono, a temperatura no ponto especificado pela câmera é maior que o simulado devido a condutividade do inserto com aditivo de carbono ser maior, isto faz com que a temperatura se distribua mais facilmente.

Figura 40 – Comparação da distribuição de temperatura nos insertos de aço e de PLA



Fonte: Autora (2023)

Figura 41 – Fotografia térmica do inserto C



Fonte: Autora (2023)

## 4.2 ANÁLISE DOS PRODUTOS

Durante os processos de moldagem por injeção todas as peças foram analisadas visualmente focando na face do produto que entrou em contato com a superfície de PLA. Conforme a metodologia, nove amostras provenientes do inserto A e onze amostras provenientes do inserto B e C foram selecionadas para avaliação da variação dimensional e de propriedades mecânicas. A primeira peça moldada com o inserto B e C foram descartadas, a marcação das peças foi iniciada a partir do

produto seguinte. Desta maneira, será possível visualizar os efeitos da deformação do molde no produto injetado.

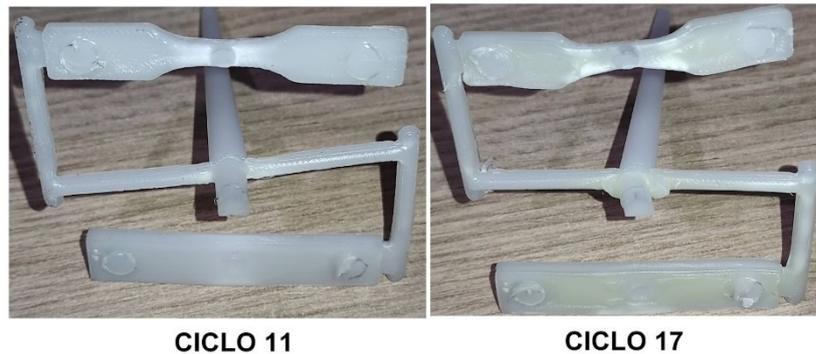
Os moldados do Inseto A, representados pelas amostras na Figura 42, apresentaram em sua superfície a geometria em forma de malha, proveniente do espaçamento entre os filamentos do inserto e rebarbas nos sensores e pinos extratores. Notou-se que os onze primeiros produtos apresentaram geometrias aceitáveis para a aplicação, porém o aumento da pressão de injeção nos cinco ciclos seguintes causou avarias no poço frio e na superfície do inserto degradando os furos de sensores e pinos extratores ocasionando o aumento de rebarbas, empenamento, contração e coloração amarelada nos produtos, proveniente do inserto. A Figura 43 apresenta os produtos moldados nos ciclos onze e dezessete, ciclo anterior e posterior a variação de pressão, onde pode-se visualizar a deformação ocorrida.

Figura 42 – Análise visual das amostras dos produtos injetados no Inseto C



Fonte: Autora (2023)

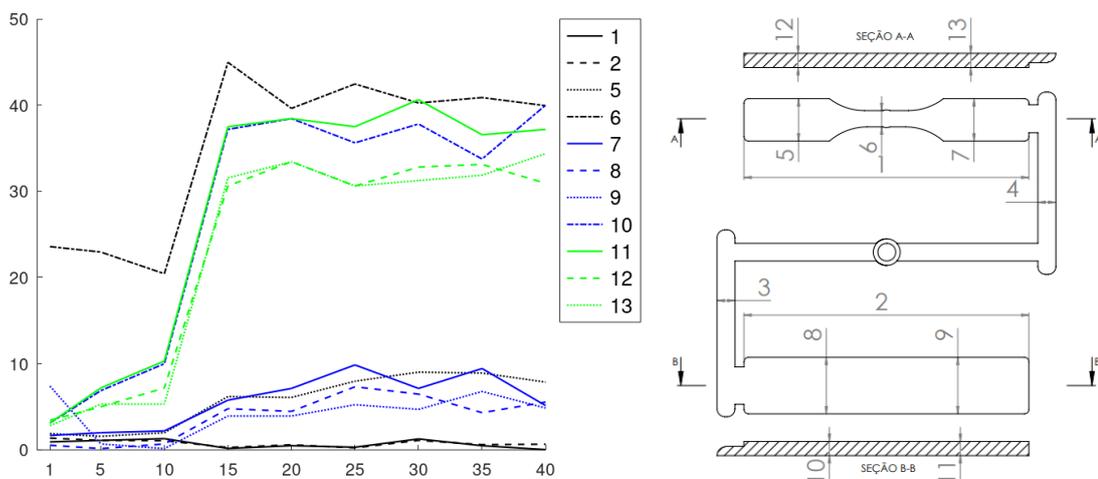
Figura 43 – Produtos moldados no ciclo 11 e 17



Fonte: Autora (2023)

Nos ciclos seguintes a deformação ocorreu de forma contínua afetando principalmente a face inferior do inserto gerando o aumento da espessura dos produtos moldados, como confirmado no gráfico apresentado na Figura 44 onde mostra a porcentagem da variação dimensional comparado ao projeto CAD, assim como os pontos de coleta. Pode-se observar o aumento abrupto das cotas 10 e 11 referentes as espessuras do corpo de prova de impacto, 12 e 13 referentes as espessuras do corpo de prova de tração e 6 da largura da parte central do corpo de prova de impacto, a variação que chegou a 45% da geometria projetada no corpo de prova de tração.

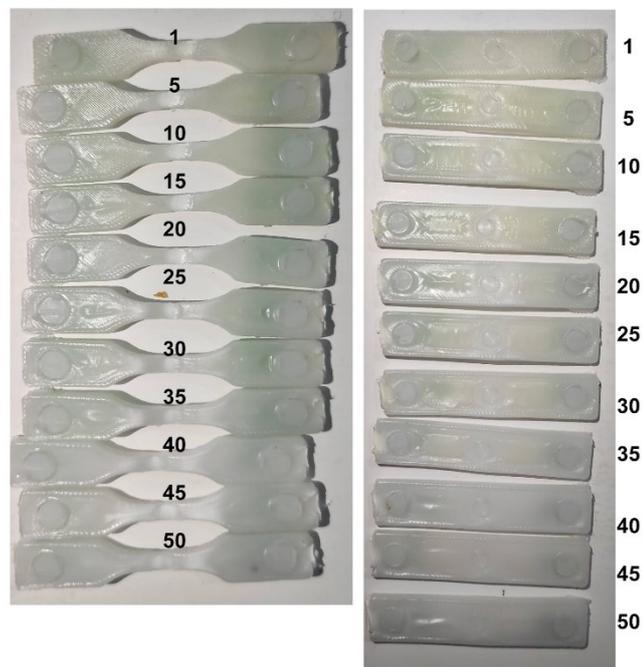
Figura 44 – Variação dimensional inserto A



Fonte: Autora (2023)

Assim como ocorrido no primeiro experimento, os produtos moldados com o Inserto B apresentaram marcas proveniente do contato com os extratores e sensores, Figura 45, a deformação do inserto ocorreu de forma contínua principalmente na face, devido ao vazamento no primeiro ciclo de injeção os canais de alimentação apresentaram rebarba. A utilização de ângulo de saída ficou pouco aparente nos produtos moldados, já a utilização do sensor alojado causou um ressalto que foi aumentando durante o processo.

Figura 45 – Análise visual das amostras dos produtos injetados no Inserto B

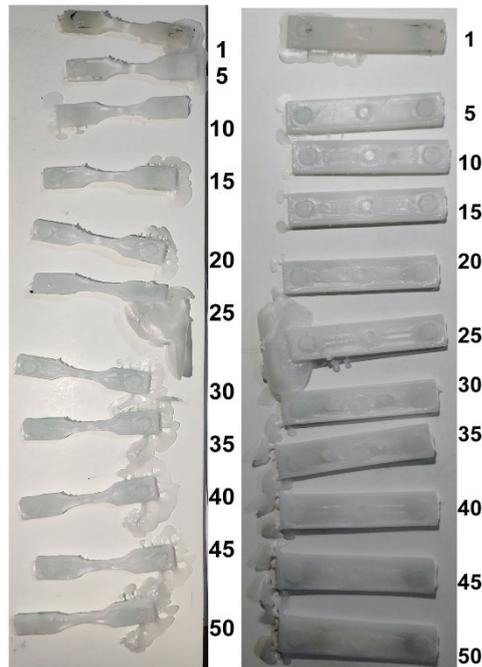


Fonte: Autora (2023)

Os moldados do Inserto C, representados pelas amostras na Figura 46, apresentaram muitas rebarbas principalmente na região final de preenchimento dos produtos. As marcas dos extratores e sensores ficaram bem evidentes e apresentaram crescimento com o avanço do processo de injeção.

Percebeu-se que os seis primeiros corpos de prova de impacto moldados apresentavam geometria aceitável e não possuíam contração volumétrica, os corpos de prova de tração devido à superfície do inserto C apresentaram deformação próximo ao pescoço, Figura 47, e pode-se perceber a evolução do defeito no decorrer dos próximos ciclos aumentando o espaçamento entre os filamentos do inserto.

Figura 46 – Análise visual das amostras dos produtos injetados no Inserto C



Fonte: Autora (2023)

Figura 47 – Deformação do pescoço do corpo de prova



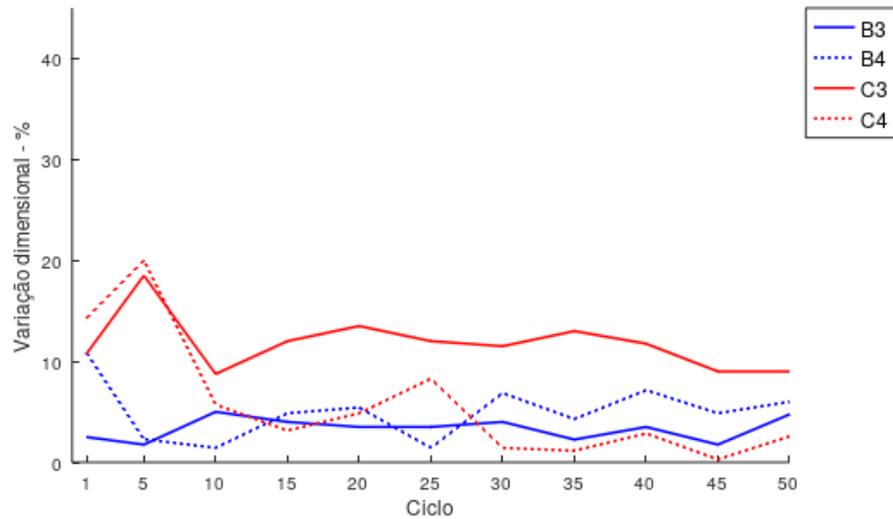
Fonte: Autora (2023)

Para análise comparativa entre os insertos, os dados foram agrupados e assim pode-se observar em porcentagem a variação da geometria do produto moldado comparado ao projeto, a deformação dos canais de alimentação não foi analisada no inserto A, os demais foram analisados em todas as categorias. Deformações acentuadas nas peças iniciais são justificadas devido à presença de rebarbas.

A deformação dos canais de alimentação apresentou deformação média similar, Figura 48, destacando o canal de alimentação do corpo de prova de impacto moldado no inserto C que apresentou maior deformação, assim como sua deformação

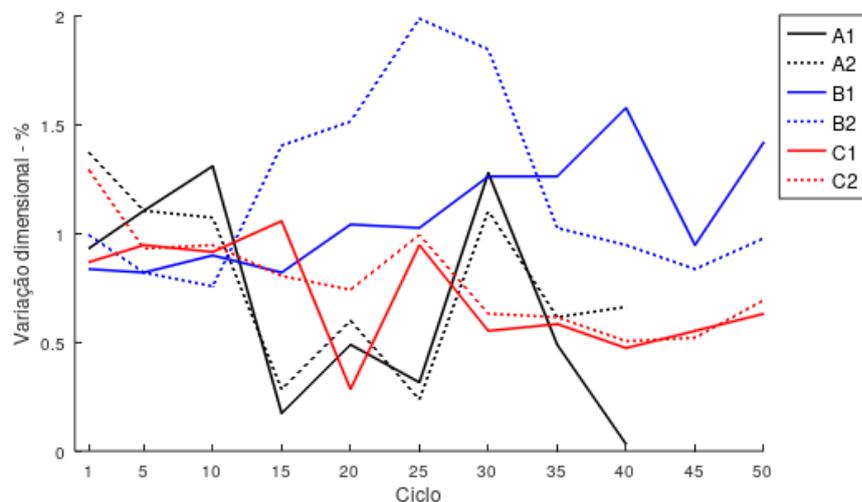
no comprimento, Figura 49, apesar da deformação máxima no comprimento ser de apenas 2% e do canal de alimentação ser de 20%.

Figura 48 – Deformação dos canais de alimentação (Cotas 3 e 4)



Fonte: Autora (2023)

Figura 49 – Deformação cotas 1 e 2 dos produtos

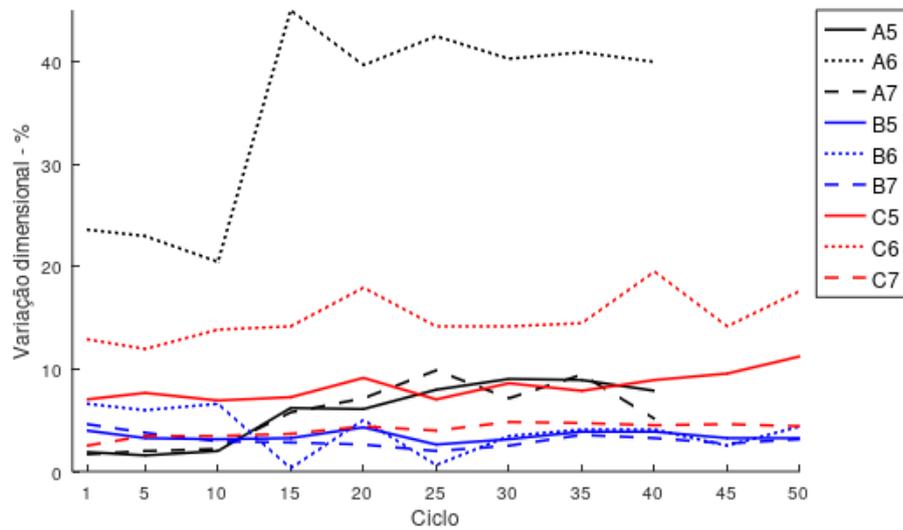


Fonte: Autora (2023)

Fica claro na Figura 50, que a região de maior deformação do corpo de prova de tração foi central, cota 6, área onde o fluxo é restringido. O corpo de prova de impacto apresentou deformação inferior e crescente comparado ao corpo de prova de tração, Figura 51, local de maior deformação foi na entrada do fluxo, mesmo resultado apresentado na Figura 52 onde pode-se observar a maior deformação da

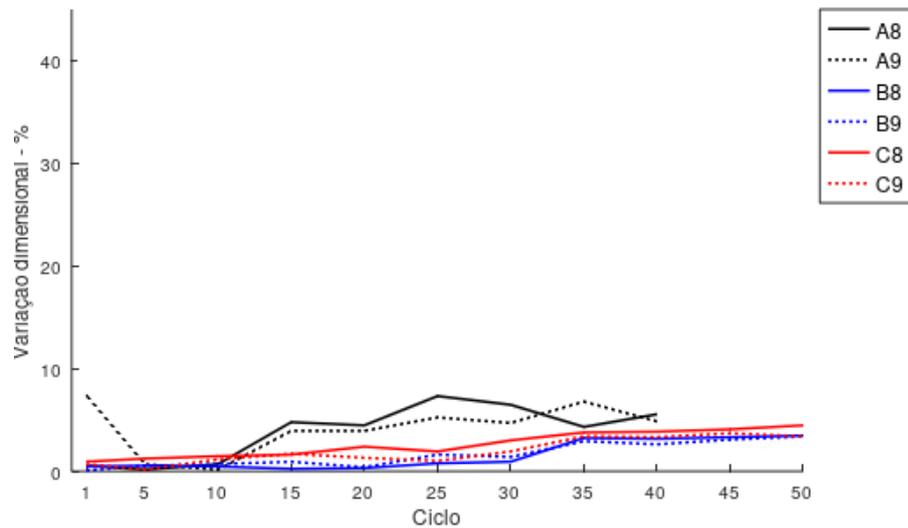
espessura na entrada do corpo de prova de impacto e no final do corpo de prova de tração.

Figura 50 – Deformação cotas 5, 6 e 7 do corpo de prova de tração



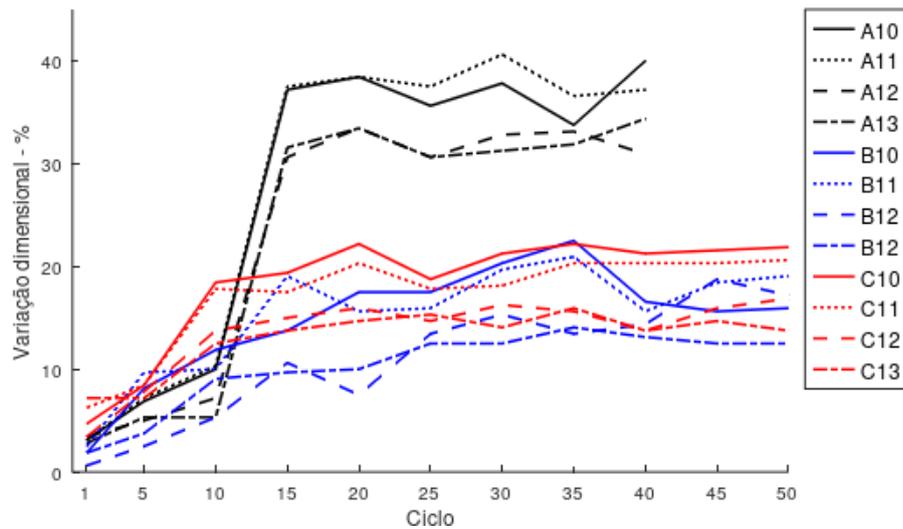
Fonte: Autora (2023)

Figura 51 – Deformação cotas 8 e 9 corpo de prova de impacto



Fonte: Autora (2023)

Figura 52 – Deformação das espessuras (Cotas 10, 11, 12 e 13)

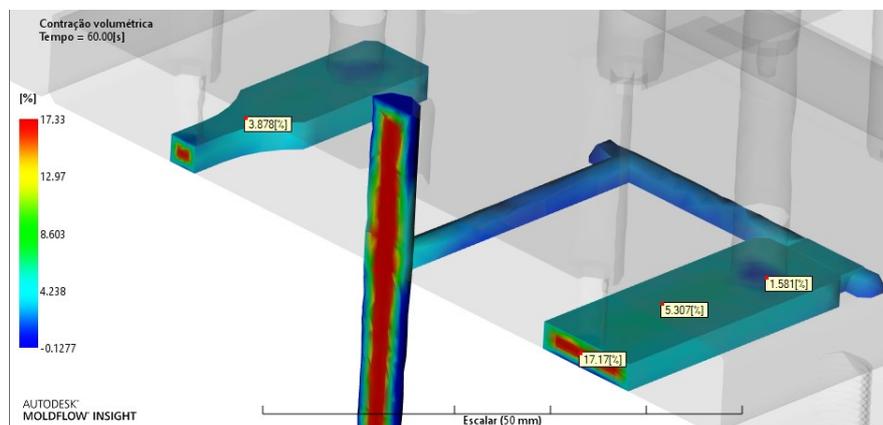


Fonte: Autora (2023)

Dentre as análises, a área mais afetada foi a face inferior dos insertos gerando produtos com variação de até 40% de sua espessura, porém esse valor é referente aos produtos moldados pelo inserto A após o incremento de pressão demonstrando a sensibilidade do inserto à pressão. Produtos moldados pelo inserto C seguiram a mesma tendência de crescimento que o inserto B, entretanto os produtos do inserto B apresentaram menor deformação.

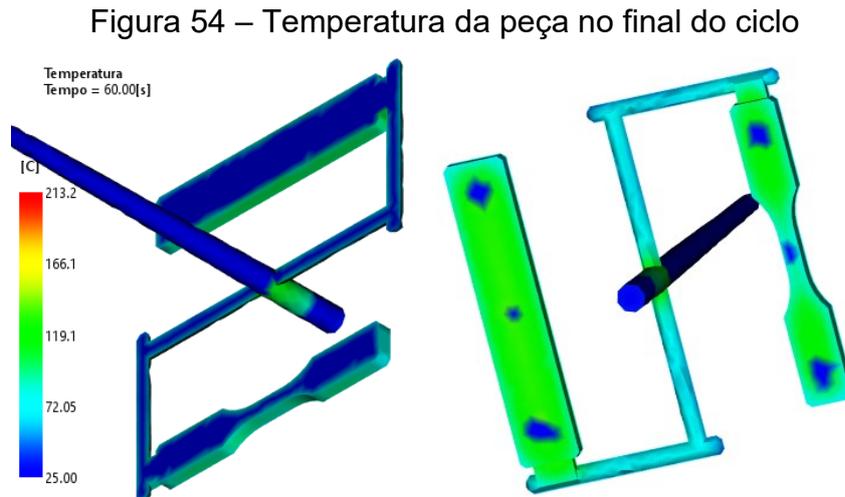
Os produtos moldados a partir do ciclo 10 apresentaram contração da região central da superfície inferior que manteve contato com o inserto, este resultado era esperado conforme a Figura 53 da simulação CAE, porém ocorreu em maiores proporções. A face em contato com o material metálico não apresentou deformação.

Figura 53 – Contração volumétrica



Fonte: Autora (2023)

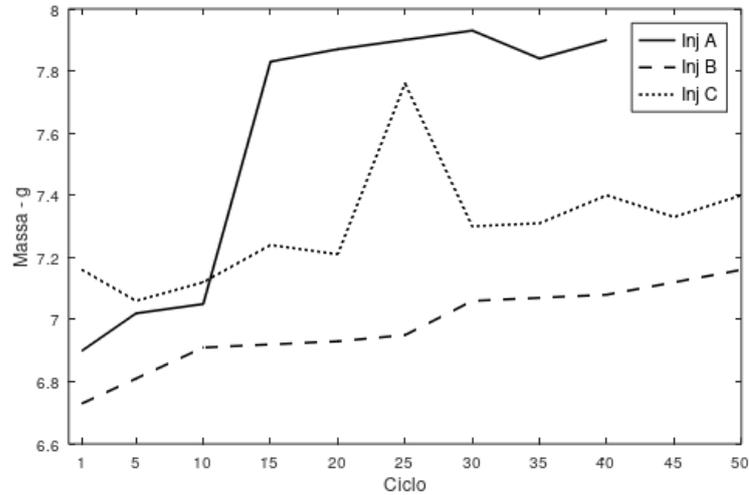
Uma hipótese para o ocorrido é o fato de o produto ter contato com superfícies de diferentes materiais, com taxas de troca de calor diferentes, onde a superfície de aço apresenta menor temperatura do que o lado da cavidade polimérica como pode ser visualizado na Figura 54. A variação dimensional do inserto B e C estão disponíveis no Apêndice B.



Fonte: Autora (2023)

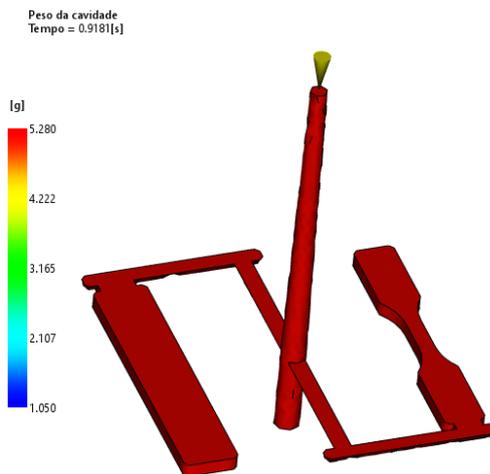
A Figura 55 apresenta a variação da massa durante o processo de injeção, tal como esperado, no processo com o inserto A ocorre aumento brusco de massa entre os ciclos 10 e 15 chegando ao máximo de 7,9 g. Ao analisar o desgaste da cavidade em função da massa dos produtos injetados fica nítida a deformação do inserto a partir da primeira injeção onde na peça com menor massa, produzida com o inserto C, apresenta a massa 1,44 g acima do esperado pela simulação CAE, Figura 56.

Figura 55 – Variação de massa dos produtos moldados com Inserto A, B e C



Fonte: Autora (2023)

Figura 56 – Massa simulada



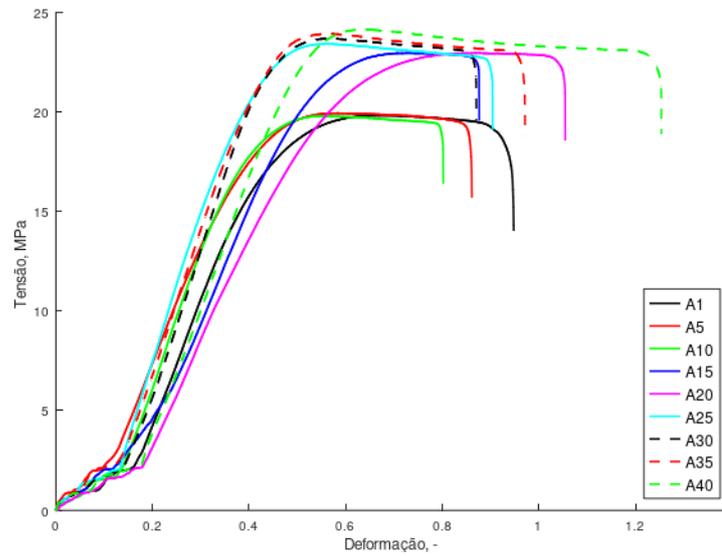
Fonte: Autora (2023)

É importante salientar que assim as dimensões das peças moldadas em moldes híbridos não dependem somente da contração do material, mas também da deformação do inserto, como observado no estudo Martinho (2010), ao utilizar inserto macho em resina. Martinho (2010) afirma que a temperatura do molde e pressão recalque são os fatores principais que afetam dimensões finais dos produtos moldados.

As curvas de tensão por deformação apresentadas nas Figura 57, Figura 58 e Figura 59 foram geradas utilizando a largura de corpo cada corpo de prova testado, porém a espessura foi considerada padrão. Para o cálculo da deformação foi considerado o comprimento inicial como 63,5 mm.

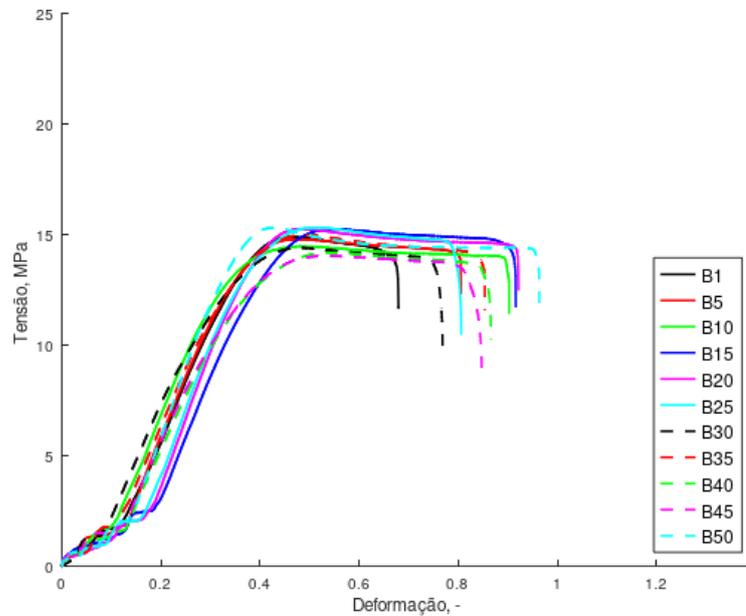
O comportamento dos produtos moldados utilizando os insertos B e C durante o ensaio de tração não foram similares, os produtos moldados utilizando o inserto A apresentam queda na tensão máxima após o incremento da pressão de injeção.

Figura 57 – Tensão x Deformação Inserto A



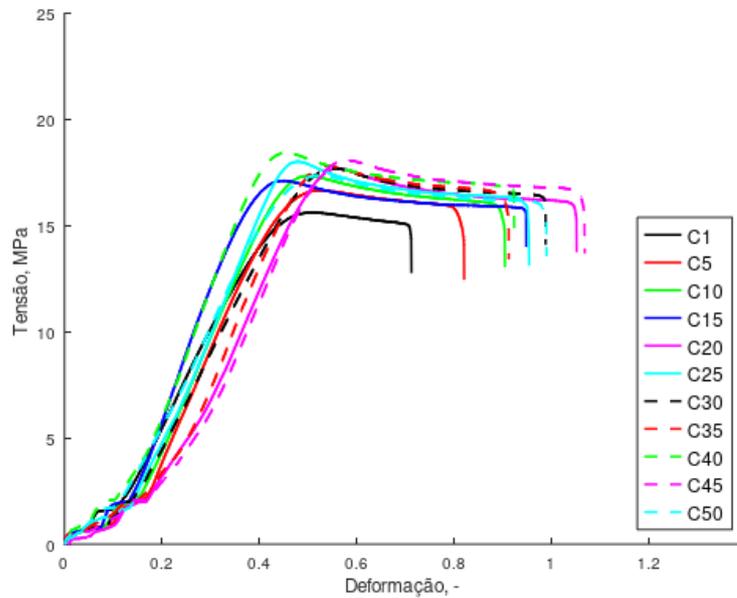
Fonte: Autora (2023)

Figura 58 – Tensão x Deformação Inserto B



Fonte: Autora (2023)

Figura 59 – Tensão x Deformação Inserto C



Fonte: Autora (2023)

Os valores máximos de resistência à tração no escoamento suportada pelos corpos de prova de tração no inserto A, B e C são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores máximos de resistência à tração no escoamento

	<b>Máxima resistência à tração</b>	<b>Ciclo</b>
<b>Inserto A</b>	24,1 MPa	40
<b>Inserto B</b>	13,3 MPa	25
<b>Inserto C</b>	18,59 MPa	40
<b>Datasheet material (Braskem, 2017)</b>	39 MPa	

Fonte: Autora (2023)

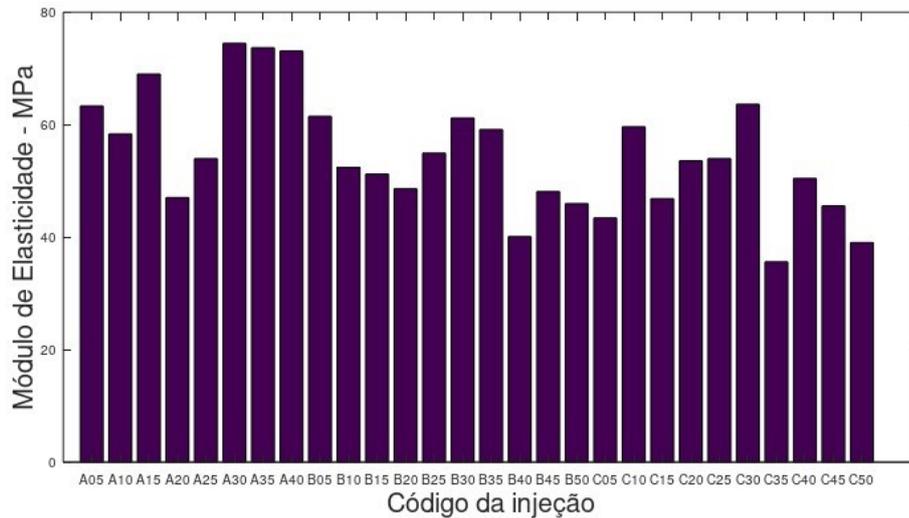
Os valores estão abaixo do indicado no datasheet do material, o resultado obtido é condizente, pois as dimensões dos corpos de prova não estavam adequadas a norma, outro fator de grande importância é a deformação presente na parte central do corpo de prova, oriunda do posicionamento do sensor e dificuldade de extração, como apresentado na Figura 47.

O módulo de elasticidade também ficou abaixo do esperado para o material, o maior módulo de elasticidade foi de 75,5 MPa na peça injetada, Figura 60.

Os fenômenos observados no presente estudo foram similares aos resultados outros estudos, como Baretta (2007), Foggiatto et al (2004) e Marin et al. (2016) que

verificaram avarias do canal de alimentação, aumento do espaçamento entre filetes e distorções na geometria do produto utilizando insertos poliméricos no processo de injeção.

Figura 60 – Valores do módulo de elasticidade



Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 7 são apresentados os dados obtidos no teste de impacto para a energia total absorvida e energia absorvida pelos corpos de prova de impacto, estes que foram identificados pelo inserto em que foram moldados.

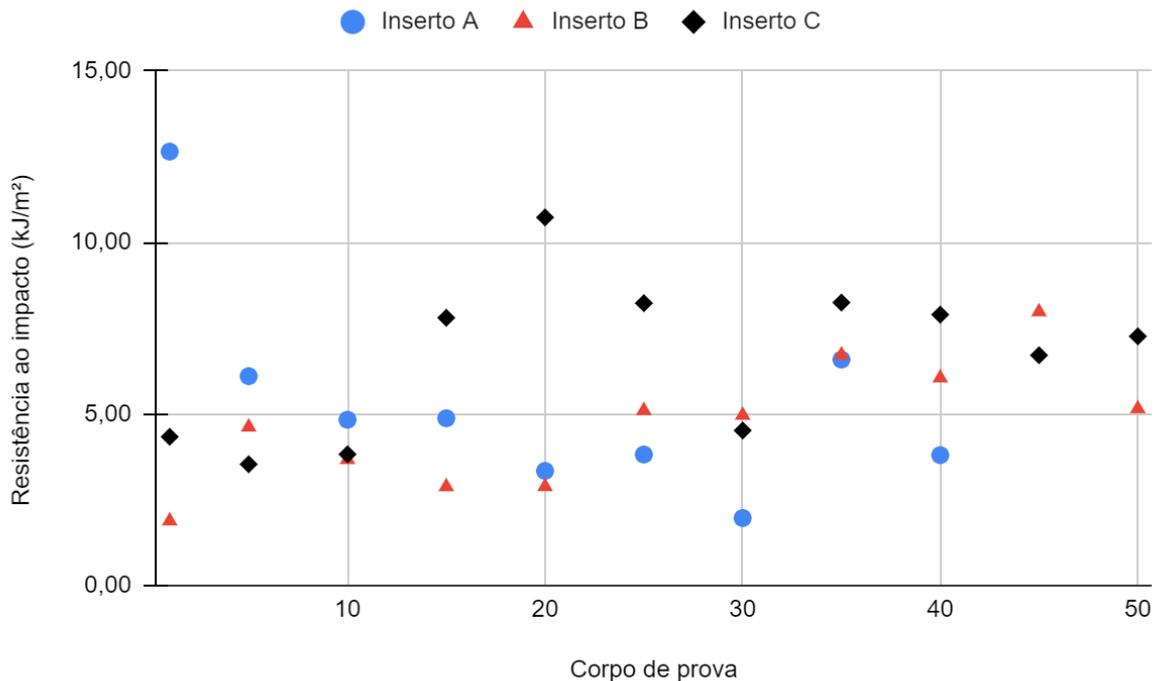
Tabela 7 – Teste de impacto Izod

Nº	Energia total absorvida (J)			Energia absorvida (J)		
	Inserto A	Inserto B	Inserto C	Inserto A	Inserto B	Inserto C
<b>1</b>	0,79	0,11	0,22	0,56	0,08	0,19
<b>5</b>	0,38	0,32	0,2	0,27	0,21	0,16
<b>10</b>	0,25	0,27	0,23	0,22	0,17	0,19
<b>15</b>	0,41	0,18	0,42	0,29	0,14	0,39
<b>20</b>	0,32	0,25	0,58	0,2	0,14	0,55
<b>25</b>	0,5	0,44	0,44	0,23	0,25	0,41
<b>30</b>	0,15	0,36	0,26	0,12	0,25	0,23
<b>35</b>	0,42	0,38	0,46	0,39	0,35	0,43
<b>40</b>	0,26	0,41	0,45	0,23	0,3	0,41
<b>45</b>		0,54	0,53		0,4	0,35
<b>50</b>		0,3	0,42		0,26	0,38

Fonte: Autora (2023)

Para o cálculo da resistência mecânica foi utilizada a energia absorvida e a área da seção transversal de cada corpo de prova, utilizando a média das cotas 8 e 9 para a largura e a média das cotas 10 e 11 para a espessura, os resultados são apresentados na Figura 61.

Figura 61 – Resistência ao impacto



Fonte: Autora (2023)

Com o gráfico da Figura 61 nota-se uma medição discrepante no corpo de prova 1 do inserto A, se considerado este valor o desvio padrão para o conjunto de dados fica em 3,08. Desta forma na Tabela 8 está apresentado a média dos valores de resistência ao impacto desconsiderando a medição discrepante.

Tabela 8 – Resistência ao impacto

	Média (kJ/m <sup>2</sup> )	Desvio padrão
<b>Inseto A</b>	4,42	1,50
<b>Inseto B</b>	4,72	1,81
<b>Inseto C</b>	6,65	2,29

Fonte: Autora (2023)

Levando em consideração a natureza do experimento e as variáveis inerentes ao processo, os valores de resistência ao impacto não são possíveis de serem comparados a outros trabalhos. Desta forma, dentro da metodologia aplicada, os corpos de prova moldados pelo inserto C apresentaram média maior que os corpos de prova moldados pelo inserto A e B, um dos fatores que possivelmente influenciou o resultado é a diferença de temperatura apresentada no inserto com relação aos demais proveniente da adição de fibra de carbono.

## 5 CONCLUSÕES

O uso do software Moldflow mostrou-se de extrema importância para a determinação do balanceamento dos canais, parâmetros utilizados nos processos de injeção e também auxiliaram no entendimento dos resultados obtidos no experimento.

Na utilização do inserto fabricado por FDM com o material PLA ou PLA+20% de fibra de carbono é de grande importância que o processo FDM utilize preenchimento total e atenção a contração do material para o sucesso do inserto no processo de injeção. Faz-se necessário controle da temperatura e pressão no molde durante o processo de injeção para garantir uma maior vida útil ao inserto e a estabilidade dimensional das peças.

O inserto de PLA com 20% de fibra de carbono apresentou grande contração após o processo de FDM, fato que prejudicou as peças moldadas com o mesmo. Ao comparar os resultados obtidos do inserto B e C é notável o menor desempenho dimensional e visual das peças moldadas com o inserto C, possivelmente devido à adição das fibras de carbono que alteram a transferência de calor do material.

A geometria do moldado não pode apresentar restrição de fluxo devido à dificuldade de extração, a utilização de sensores e pinos extratores geram marcas nos produtos. Além disso, a tolerância dimensional precisa ser baixa, visto que desvios dimensionais foram apresentados a partir da primeira peça moldada evidenciando que as dimensões das peças produzidas em moldes híbridos dependem não somente da contração do material injetado, mas também da deformação sofrida pelo inserto.

Em relação ao comportamento mecânico, avaliado através do ensaio de resistência tração, observa-se que os produtos moldados apresentaram propriedades mecânicas inferiores as apresentadas em pelo fabricante. O fato ocorreu devido à deformação plástica sofrida nos corpos de prova no processo de extração e variação da geometria.

Os insertos de PLA sem adição de carbono apresentaram os melhores desempenhos dentre as análises realizadas, a utilização de aditivo de fibra de carbono requer maiores estudos para a compensação da contração após processo de FDM. Assim sendo, as análises apresentadas demonstraram que a utilização de moldes híbridos fabricados por FDM é possível para pequenos lotes de produção, porém sua utilização requer maior atenção na fase de projeto, escolha do material e produção.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em relação ao desenvolvimento de novas pesquisas baseadas nos métodos aqui utilizados e para aprimoramento dos mesmos, recomenda-se:

Refazer o experimento utilizando insertos macho e fêmea do mesmo material;

Avaliar a utilização de refrigeração no molde;

Aprimorar a melhor geometria de construção do canal de alimentação;

Avaliar o posicionamento de pinos extratores e sensores;

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Jasim. Thermal properties of polylactides and stereo complex. **Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials**, p. 261-279, 2017.
- American Society for Testing and Materials. **ASTM D256-23** Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken. 2023. 20 p.
- American Society for Testing and Materials. **ASTM D638-22**: Standard test method for tensile properties of Plastics. West Conshohocken. 2022. 16 p.
- BARETA, D. R. **Estudo comparativo e experimental de materiais aplicados a insertos macho de moldes de injeção dentro do conceito de molde híbrido**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.
- BODEN S., et al. **Thermal behaviour of hybrid injection moulds for short production series** in: **International Conference on Polymers and Moulds Innovations**. PMI. Chigago, 2018.
- BRASKEM. **Folha de dados**: Polipropileno H105. 2017. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/produto/download?id=3cs6PcLREPU=&folhadados=true>. Acesso em: 10 jun. 2023
- CAMARGO, José C. et al. Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, p. 2423-2443, 2019.
- CHUA C. K.; HONG, K. H., HO, S. L. "Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study" **Int J Adv Manuf Technol**, v.15, p.604-608, 1999.
- CORDEIRO, M. J. **Análise e otimização dos parâmetros processuais e dos sistemas funcionais de uma impressora 3D, que se baseia na técnica Deposição de Plástico Fundido (FDM)**. 2014. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.
- CUNHA, A. - **Manual do projetista para moldes de injeção de plásticos: moldação por injeção e materiais plásticos**. Marina Grande: Centimfe, 2003.
- DRECHSLER, Maikol Funk; SACHELLI, Carlos Maurício. **Análise Térmica de Insertos Poliméricos em Moldes Híbridos Através de Instrumentação e Simulação**. in: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. nº 9, 2017, Joinville. Joinville: ABCM 2017.

DUTY, Chad E. et al. Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 1, p. 181-189, 2017.

FOGGIATTO, José A. et al. Moldes de ABS construídos pelo processo de Modelagem por Fusão e Deposição para injeção de PP e PEBD. **Polímeros**, v. 14, p. 349-353, 2004.

GARLOTTA, Donald. A literature review of poly (lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 63-84. 2001.

GHOSH, B.; BANDYOPADHYAY-GHOSH, S.; SAIN, M. **Composites, Poly (lactic acid) Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**. 2010.

GORNI, Antonio Augusto. Introdução à prototipagem rápida e seus processos. **Revista Plástico Industrial**, v. 230, p. 239, 2001.

HARADA, K., & UEKI, T. **Injection Molding Handbook**. 3r ed. Springer, 2012.

HOEKSTRA, Janny C.; LEEFLANG, Peter SH; WITTINK, Dick R. The customer concept: the basis for a new marketing paradigm. **Journal of market-focused management**, v. 4, p. 43-76, 1999.

Indusmart. PLA. **Indusmart**. Disponível em: <https://www.indusmart.com.br/materiais/pla/>. Acesso: 20 jun. 2023.

IYER, S. Six facts about the global injection molding market and the automotive industry. **Plastics Today**, 2019. Disponível em: <https://www.plasticstoday.com/injection-molding/six-facts-about-global-injection-molding-market-and-automotive-industry>. Acesso em: 15 out. 2022

JIANG, Jing et al. Effect of mold temperature on the structures and mechanical properties of micro-injection molded polypropylene. **Materials & Design**, v. 88, p. 245-251, 2015.

KOVÁCS, Norbert Krisztián; KOVÁCS, József Gábor. Developments in the field of rapid prototype production. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2008. p. 421-425.

LANZOTTI, Antonio et al. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, 2015.

LEÃES, Vinícius S. **Avaliação da influência da diferença de temperatura entre as placas de um molde de injeção no empenamento de peças injetadas**. 2008. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville. 2008.

LOVE, Lonnie J. et al. The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. **Journal of Materials Research**, v. 29, n. 17, p. 1893-1898, 2014.

MANO, E. B.; MENDES, L. C; **Introdução a polímeros**, 2 ed., Edgard Blücher Ltda: São Paulo, 2004.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2013.

MARIN, Felipe, et al. **Investigação da Influência de Moldes Híbridos Fabricados pela Técnica de FDM para Injeção de Peças Plásticas**. *in: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. nº 22. Natal, 2016.

MENDIBLE, Gabriel Antonio; RULANDER, Jack A.; JOHNSTON, Stephen P. Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding. **Rapid Prototyping Journal**, 2017.

MENG, Bing et al. Transparent and ductile poly (lactic acid)/poly (butyl acrylate) (PBA) blends: Structure and properties. **European Polymer Journal**, v. 48, n. 1, p. 127-135, 2012.

OSSWALD, T. A.; HERNANDEZ-ORTIZ, J. P.; SHAFFER, G. F. **Handbook of Plastic Processes**. 2 ed. Wiley, 2018.

PINHEIRO, Felipe Locatelli, **Proposta Metodológica Para Determinação da Técnica a ser Utilizada na Fabricação de Ferramental Rápido: Um Estudo de Caso na Concepção do Molde Protótipo para Injeção Plástica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção e Sistemas). 165 f. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

PLA (96:4 L:D ratio content) produced by NatureWorks Co., **Technical data sheet**, Disponível em: [www.natureworkslc.com](http://www.natureworkslc.com). Acesso em: 10 jun. 2023

PONTES, A.J., *et. al.*. **Experimental assessment of hybrid mould performance**, *In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 50, p. 441–448 (2010)

Pontes, A.J., *et. al.*. **A study on design and performance of hybrid moulds for injection moulding**, *In: International Conference on Industrial Tools*, nº5, Celje, Slovenia, 2005.

RAJAGURU, J.; DUKE, M. e AU, C. **Development of rapid tooling by rapid prototyping technology and electroless nickel plating for low-volume production of plastic parts**. *in: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015. Vol. 78, pp. 31-40.

RIBEIRO Jr, A. S. **Proposta de utilização de ferramentas CAE no planejamento do processo de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes de estereografia**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

ROSATO, V. D. **Injection Molding Handbook**. New York: Chapman & Hall, 1995.

SACCHELLI, C. M. et al. **Simulação computacional da injeção de termoplásticos: comparação de ferramentas tipo CAE**. In: **Anais do 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Joinville: COBEF, 2017.

SACCHELLI, Carlos Mauricio. **Sistematização do processo de desenvolvimento integrado de moldes de injeção de termoplásticos**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SAHPUTRA, Iwan Halim. Comparison of two flow analysis software for injection moulding tool design. In: **2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**. IEEE, 2007. p. 607-611.

SANTANA, Leonardo et al. A comparative study between PETG and PLA for 3D Printing through thermal, chemical and mechanical characterization. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

SARAIVA, V.M., LIMA, M. and POUZADA, A.S. **Towards a new conceptual design of injection molds**, *in: International Scientific Colloquium*, nº 44, 1999.

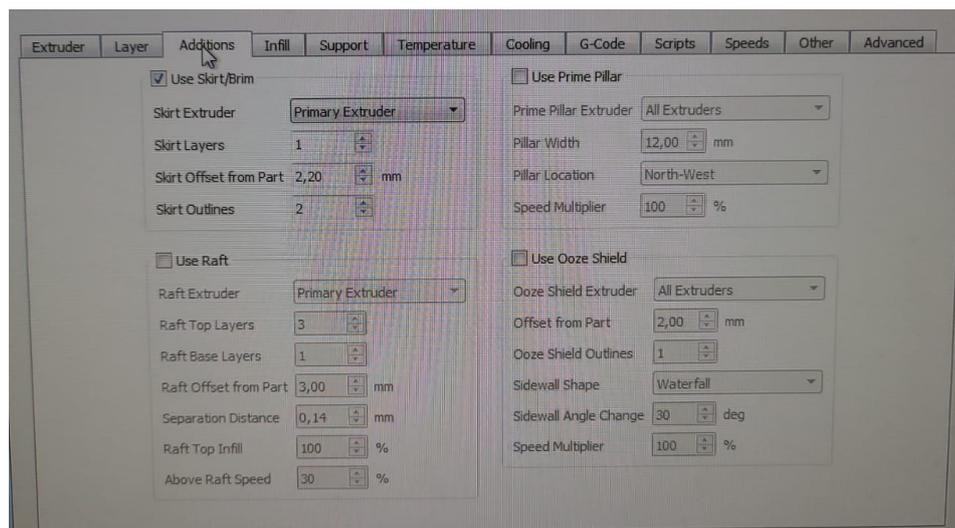
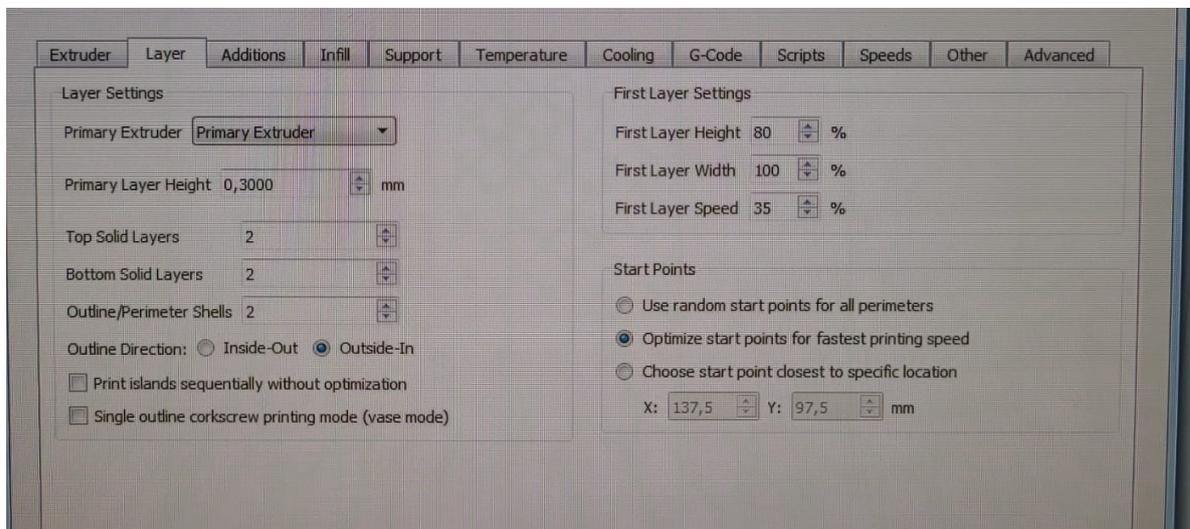
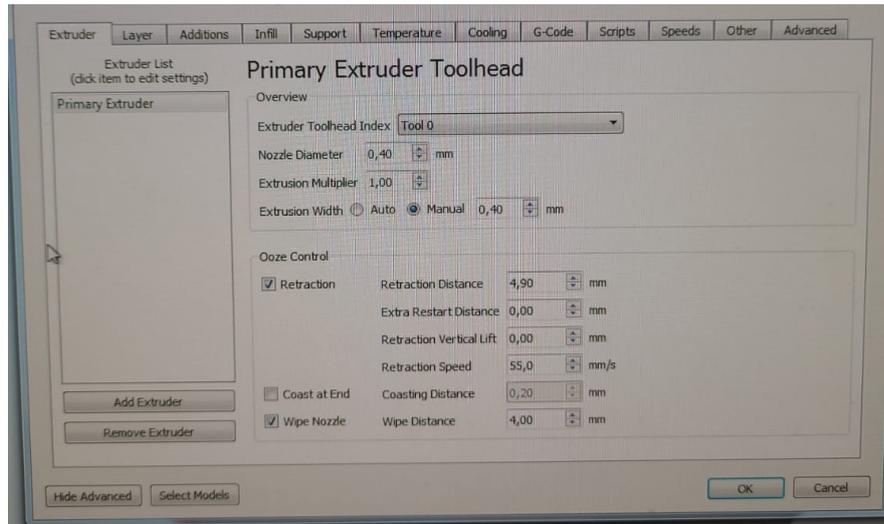
SILVA, Renan Wagner Novaes; GIANNINI, Helio. **AS VANTAGENS DA FIBRA DE CARBONO EM RELAÇÃO AO AÇO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**. 2019.

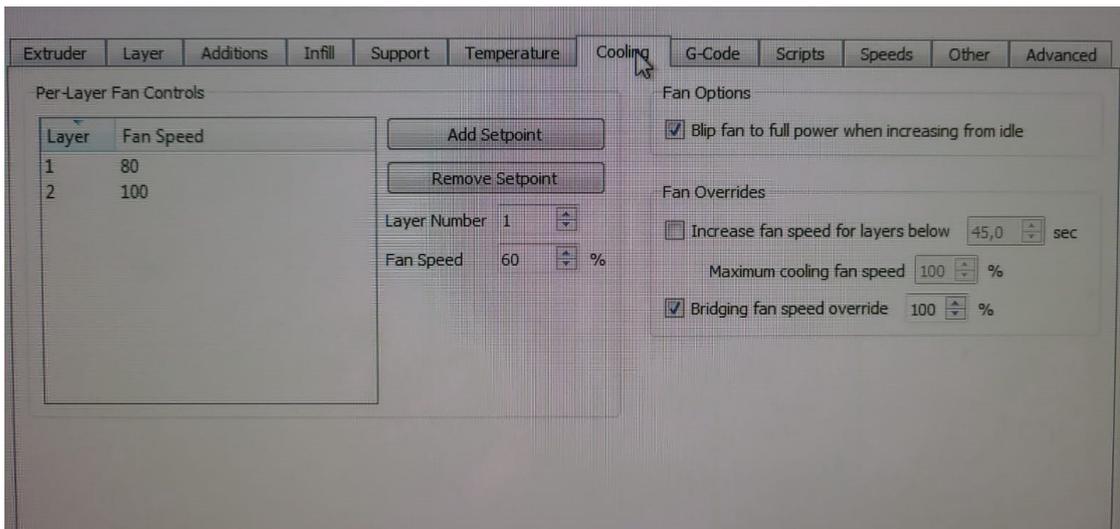
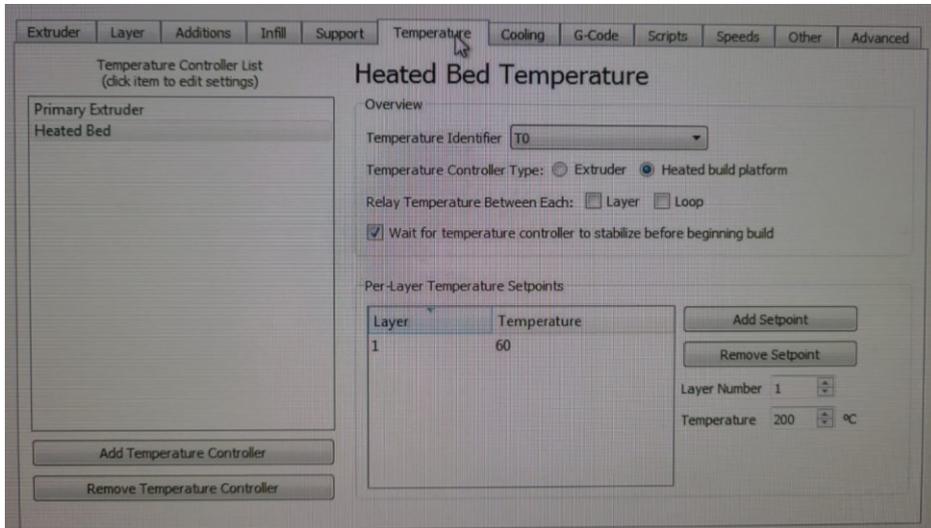
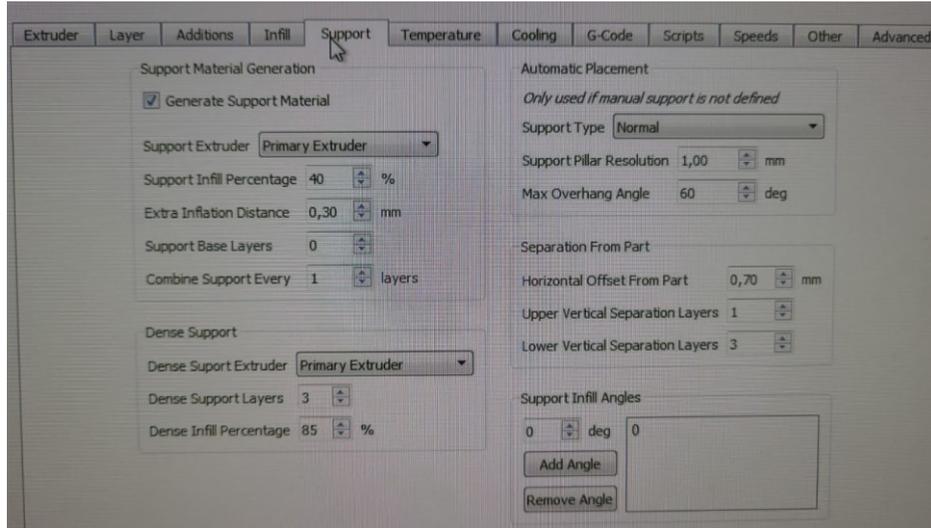
TÁBI, T. et al. Comparison of thermal, mechanical and thermomechanical properties of poly (lactic acid) injection-molded into epoxy-based Rapid Prototyped (PolyJet) and conventional steel mold. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 123, p. 349-361, 2016.

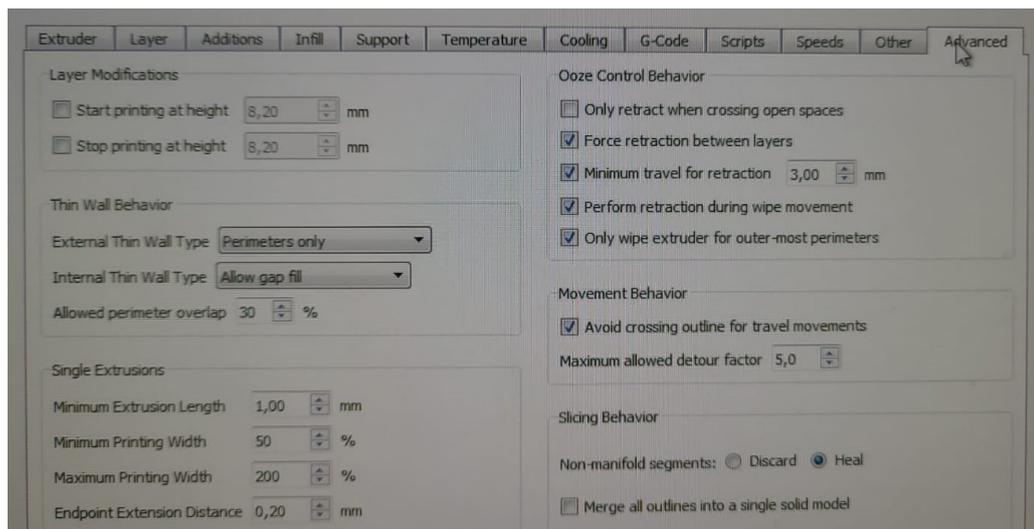
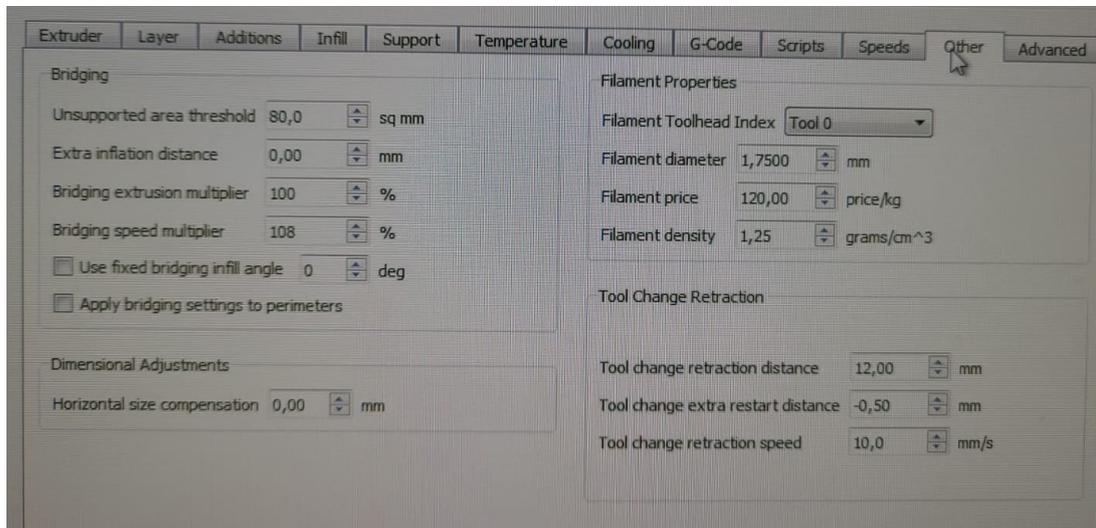
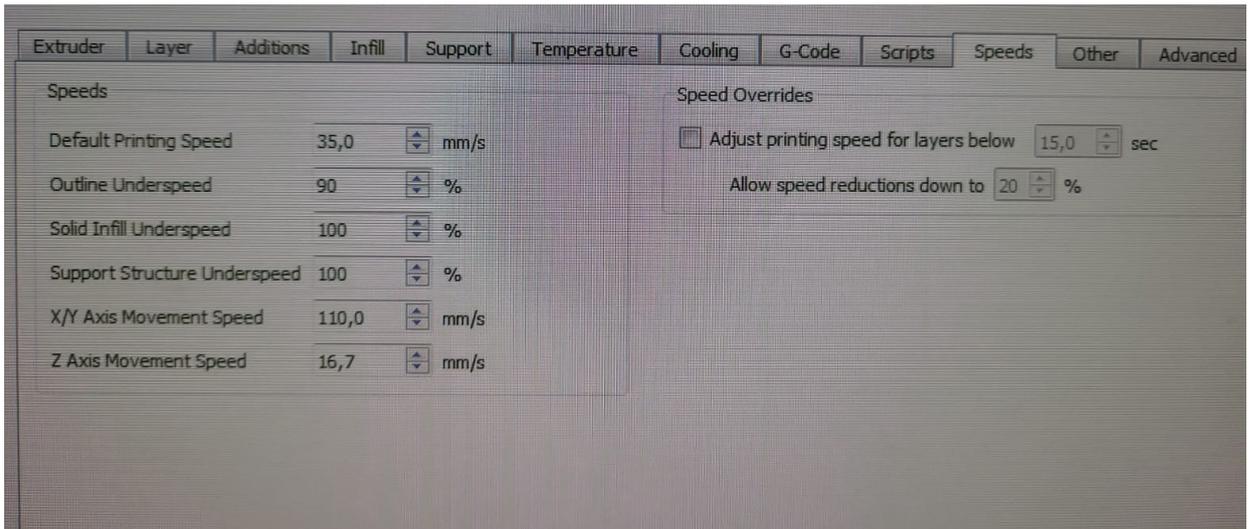
Technical Data Sheet S030 - *PLA (Polylactid Acid)*, Disponível em: <https://www.sd3d.com/3d-printing/materials/> Acesso: 03 jan. 2023.

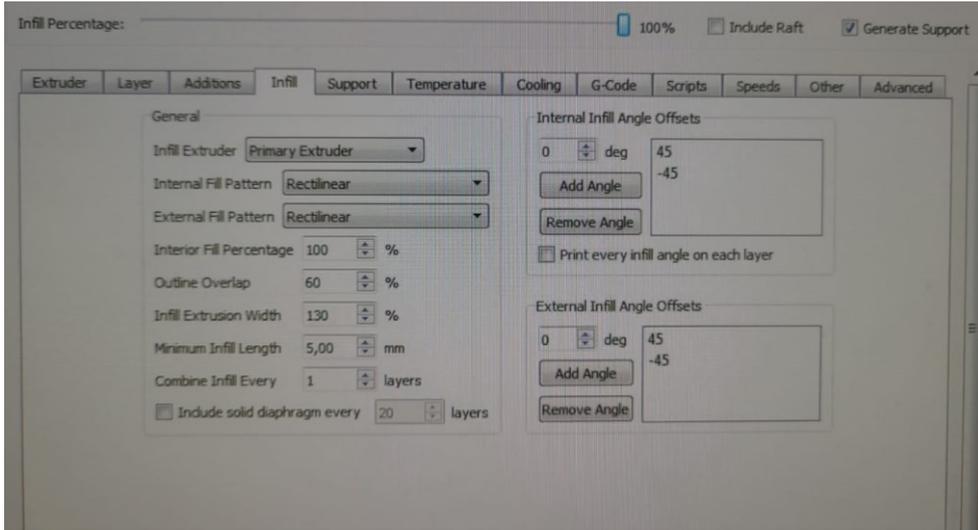
VIANA, J. and CUNHA, A.M., **Impact performance of injection molded PP plates**, *in: PPS Annual Meeting*, nº 12. Sorrento. 1996

## APÊNDICE A - Parâmetros utilizados FDM



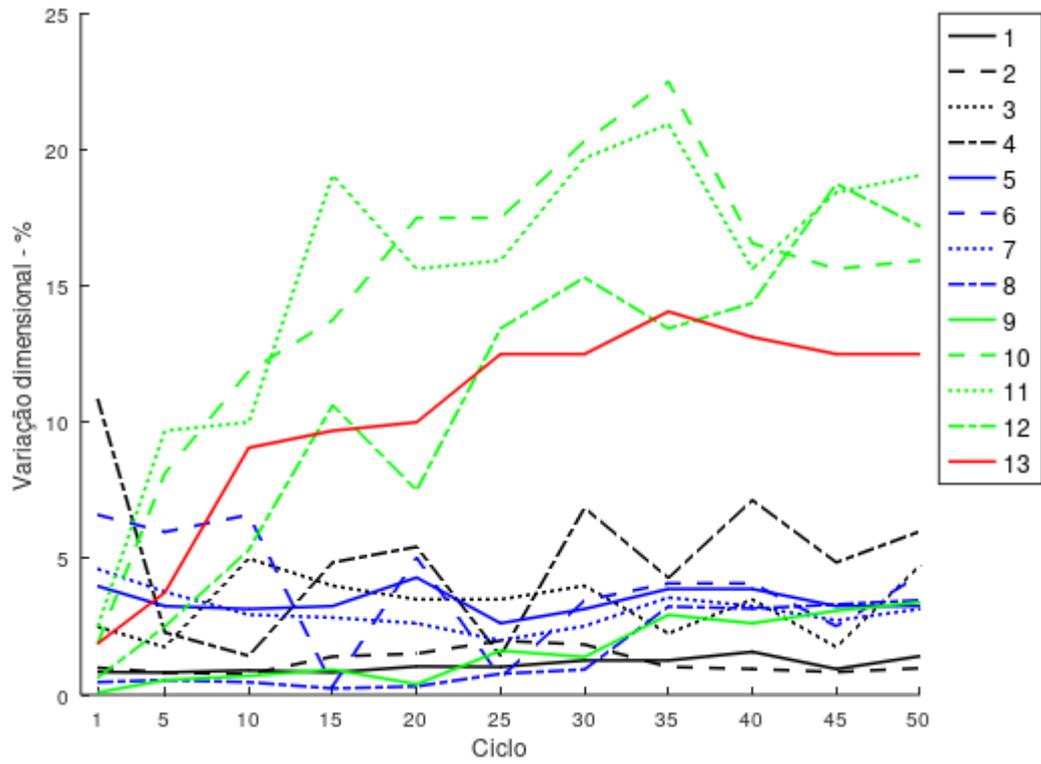






## APÊNDICE B – Variação dimensional dos produtos finais

Variação dimensional inserto B



Variação dimensional inserto C

