

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

GUILHERME CICHIN SPIGOLON

ESTUDO DA CONTRAÇÃO DE PRODUTOS POLIMÉRICOS INJETADOS

CAXIAS DO SUL

2022

GUILHERME CICHIN SPIGOLON

ESTUDO DA CONTRAÇÃO DE PRODUTOS POLIMÉRICOS INJETADOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Matrizes e Ferramentas

Orientador: Prof. Dr. Eng. Marcos Alexandre Luciano.

CAXIAS DO SUL

2022

GUILHERME CICHIN SPIGOLON

ESTUDO DA CONTRAÇÃO DE PRODUTOS POLIMÉRICOS INJETADOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Matrizes e Polímeros

APROVADO EM 30 / 06 / 2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Eng. Eduardo Thomazi
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a contração em produtos poliméricos injetados, e os efeitos do processo que alteram este valor. Através de um molde já existente, foram realizadas simulações de injeção em *software* para encontrar os parâmetros a serem reproduzidos na máquina injetora durante os ensaios. Para a validação destes parâmetros, foi utilizado um termopar que mediu a temperatura interna do molde, garantindo a similaridade entre os dados teóricos extraídos da simulação computacional e os resultados do ensaio em máquina. Após as amostras necessárias serem produzidas, foram realizadas as análises metrológicas e criado uma base de dados para comparação das deformações da peça física, com a deformação que o *software* de simulação indicou. Foram avaliados parâmetros como a repetibilidade do processo e a confiabilidade da simulação para definir um valor médio de contração em cada caso. Os resultados da simulação de injeção indicaram percentuais de contração de 1,29 % para a menor pressão de injeção utilizada (22 bar) e 0,75 % para a maior (190 bar). Nos testes práticos, os valores variaram de 0,58% até 0,69% para 19 bar e 190 bar respectivamente.

Palavras-chave: Polímeros; molde; injeção; contração.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the shrinkage in injected polymeric products, and the process effects that change this value. Through an existing mold, injection simulations were carried out in software to find the parameters to be reproduced in the injection machine during the tests. For the validation of these parameters, a thermocouple was used that measured the internal temperature of the mold, ensuring the similarity between the theoretical data extracted from the computer simulation and the results of the machine test. After the necessary samples were produced, metrological analyzes were performed and a database was created to compare the deformations of the physical part, with the deformation that the simulation software indicated. Parameters such as process repeatability and simulation reliability were evaluated to define an average shrinkage value in each case. The results of the injection simulation indicated contraction percentages of 1,29% for the lowest injection pressure used (22 bar) and 0,75% for the highest one (190 bar). For the tests, the values ranged from 0,58% to 0,69% for 19 bar and 190 bar respectively.

Key-words: Polymers; mold; injection; contraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de rechupe.....	7
Figura 2 - Produto estruturado através de nervuras.....	7
Figura 3 - Dimensionamento de nervuras	8
Figura 4 - Efeito da tolerância sobre o custo	9
Figura 5 - Processo de aquisição de dados	11
Figura 6 - Efeito de contração	13
Figura 7 - Dimensionamento do valor e controle da contração	14
Figura 8 - Cota de contração no produto.....	15
Figura 9 - Cota de contração no molde	16
Figura 10 - Origem dos fatores que influenciam na contração	17
Figura 11 - Sistema de fixação para medição	18
Figura 12 - Desenho de Produto	20
Figura 13 - Produtos que apresentam deformação nos pontos de fixação	21
Figura 14 - Fluxograma de atividades	22
Figura 15 - Molde de injeção utilizado no ensaio	23
Figura 16 - Posição do termopar	23
Figura 17 - Produto injetado.....	24
Figura 18 - Desenho do produto protótipo.....	25
Figura 19 - Refrigeração da região do produto.....	25
Figura 20 - Mínima pressão de injeção da simulação	28
Figura 21 - Deformação teórica de um produto injetado	28
Figura 22 - Injetora utilizada para os ensaios.....	30
Figura 23 - Temperatura do molde durante os ensaios.....	31
Figura 24 - Posição do termopar próximo à região de produto	31
Figura 25 - Métodos para identificação de desvios	32
Figura 26 - Verificação dimensional com produto desatualizado	33
Figura 27 - Molde protótipo antes do ajuste	34
Figura 28 - Detecção automática de superfícies	35
Figura 29 - Molde protótipo após o ajuste do modelo	36
Figura 30 – Malha para comparação com o projeto	37
Figura 31 - Ponto de medição	37
Figura 32 - Posicionamento para comparação.....	38

Figura 33 - Medida de contração na simulação de injeção	39
Figura 34 - Contração dimensional segundo a simulação.....	40
Figura 35 - Ponto de estabilidade da contração.....	41
Figura 36 - Medida do projeto	41
Figura 37 - Contração volumétrica do primeiro ensaio.....	43
Figura 38 – Produtos injetados no primeiro ensaio	44
Figura 39 - Contração volumétrica do segundo ensaio	45
Figura 40 - Produtos injetados no segundo ensaio	46
Figura 41 – Balança utilizada	49
Figura 44 - Detalhamento Lado Fixo	54
Figura 45 - Detalhamento Lado Móvel	55
Figura 46 - Temperatura do molde durante o ciclo de injeção	56
Figura 47 - Molde na máquina injetora.....	56
Figura 48 - Lado móvel na máquina injetora	57
Figura 49 - Lado fixo na máquina injetora	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de contração	13
Tabela 2 - Características físicas do polímero Daplen EH119HP	26
Tabela 3 - Parâmetros recomendados para injeção.....	27
Tabela 4 - Parâmetros definidos para a simulação e ensaio.....	27
Tabela 5 - Contração de polímeros	29
Tabela 6 - Simulação de injeção	40
Tabela 7 - Percentual de contração da simulação	42
Tabela 8 - Valores de contração no primeiro ensaio	43
Tabela 9 - Percentual de contração do primeiro ensaio	44
Tabela 10 - Percentual de contração do segundo ensaio	46
Tabela 11 - Comparação dos resultados	47
Tabela 12 - Massa das peças injetadas	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pontuação da tabela de tolerâncias	10
Quadro 2 - Dificuldades metrológicas	18

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	3
1.1.	JUSTIFICATIVA	4
1.2.	OBJETIVO GERAL	5
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1.	PROJETO DO PRODUTO INJETADO	6
2.1.1	Produtos injetados	6
2.1.2	Tolerâncias de projeto de peças injetadas	8
2.2.	DEFORMAÇÕES EM PEÇAS INJETADAS.....	12
2.2.1	Contração	12
2.2.2	Cálculo de contração	15
2.2.3	Fatores que podem influenciar na contração	16
2.2.4	Análise dimensional de produtos injetados	17
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1.	ESTUDO DE CASO.....	20
3.2.	MODELO DE ESTUDO	22
3.2.1	Molde de injeção	22
3.2.2	Produto injetado	24
3.3.	FATORES ANALISADOS E PARÂMETROS INICIAIS.....	26
3.4.	SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO.....	26
3.5.	ENSAIOS	29
3.6.	VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL.....	32
3.6.1	Verificação dimensional do molde	33
3.6.2	Verificação dimensional do produto	36
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39

4.1.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	39
4.2.	RESULTADOS DOS ENSAIO	42
4.2.1	Primeiro ensaio - 955 bar de pressão de recalque	42
4.2.2	Segundo ensaio – 668,5 bar de pressão de recalque	45
4.3.	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS	47
5.	CONCLUSÕES.....	50
5.1.	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	APÊNDICE A - PROJETO DO MOLDE PROTÓTIPO	54
	APÊNDICE B - ENSAIO	56
	ANEXOS	58

1. INTRODUÇÃO

Materiais poliméricos sempre estão presentes no cotidiano das pessoas, seja dentro de casa, nos automóveis e entre tantas outras aplicações. Essas mais variadas aplicações são possibilitadas pela versatilidade que este tipo de material pode entregar e também nas diferentes opções de transformação de polímeros.

Cracknell e Dyson (1993) citam o processo de injeção de polímeros como uma boa opção para que se tenha precisão dimensional, repetibilidade e também rapidez na produção. Também segundo Almeida e Souza (2015), os materiais poliméricos estão ganhando espaço cada vez maior na fabricação de produtos técnicos que antes eram produzidos com outros materiais, como aço por exemplo.

O processo de injeção utiliza de máquinas injetoras com variados tipos de ferramentas acopladas, que são chamadas de moldes. Segundo Harada (2004) os moldes são equipamentos que possuem cavidades com as dimensões das peças moldadas e que recebem o material polimérico fundido.

A injeção de polímeros se inicia com o material fundido, que após alguns instantes, resfria parcialmente até a solidificação no interior do molde, e chega à temperatura ambiente após extraído das cavidades.

Segundo Almeida e Souza (2015), para o melhor desenvolvimento de cada produto, é preciso que ocorram estudos de reologia dos polímeros, para que se tenha conhecimento de como o produto se comporta quando está sendo processado ou recebendo algum tipo de carga ou energia, podendo assim se ter noção de como e o que acontece após o processamento.

Existem também métodos para simulação computacional de injeção de polímeros nos quais os engenheiros projetistas podem prever a deformação do produto através da deflexão, e validar o que é previamente informado como característica da matéria prima. Além de poder avaliar a temperatura do molde e o tempo durante o ciclo de injeção, mas também características estéticas como as linhas de emenda e aprisionamento de gases no meio do produto.

A deformação causada pela variação da temperatura está presente em todos os tipos de materiais existentes, alguns com maior magnitude, outros com menor. Philpot (2013) cita essas deformações como deslocamentos de pontos individuais que se movem em um corpo de acordo com a mudança das cargas ou energia que é repassada ao material, também acrescenta que o estudo deste fenômeno possui tamanha importância no desenvolvimento do projeto quanto a das próprias cargas aplicadas ao corpo, visto que, ambas possuem ligação direta uma com a outra.

Através disso, percebe-se a importância do processo de injeção de polímeros para peças técnicas que exigem boa precisão dimensional, bom acabamento e alta produtividade. Algumas variáveis devem ser avaliadas, como a temperatura da matéria prima, o projeto do molde de injeção, a máquina injetora e várias outras, que se bem dimensionadas trazem todos os benefícios que este método de transformação de polímeros pode oferecer.

1.1. JUSTIFICATIVA

Os moldes de injeção são algumas das principais ferramentas de transformação de polímeros quando se deseja bom acabamento, repetibilidade e agilidade durante a produção.

A cidade de Caxias do Sul está entre os três maiores polos do setor, e é referência nacional para qualidade no quesito de fabricação deste tipo de produto, contendo algumas das principais indústrias metalúrgicas voltadas para estes trabalhos do Brasil.

Algumas peças produzidas com o método de injeção de polímeros exigem alta complexidade nos mecanismos presentes nestes dispositivos, que em alguns casos devem conter componentes para que o molde funcione corretamente e para que a retirada da peça injetada possa ocorrer sem que haja danos a própria peça ou ao molde. Estas situações acabam tornando o processo de certa forma caro, tendo um valor agregado ao produto injetado também elevado.

Apesar disto, este processo se faz necessário para peças com maiores exigências sobre tolerâncias geométricas. Facilmente é encontrado este cenário na indústria automotiva, onde em certos projetos de produtos poliméricos, como caixas de filtro de ar, para-choques, painéis, entre outros, toleram desvios pequenos em relação a medida nominal de projeto.

Em certos casos, estas solicitações de projeto não condizem com a realidade das deformações presentes no próprio produto, tendo em vista que a contração aplicada aos moldes é uniforme, pois é baseada em material polimérico homogêneo, ou seja, mantêm suas propriedades mecânicas iguais para todas as direções.

As divergências de contração entre peças físicas e modelos ou cálculos teóricos podem se dar através de alguns fatores como baixa pressão de injeção e recalque causada por deficiência de força de fechamento ou capacidade da máquina injetora transportar o polímero para o molde, também esta diferença pode ser causada por alta temperatura de fusão e alta temperatura do molde unido ao baixo tempo de resfriamento, tempo este que em muitos casos não é respeitado por exigência de maior produtividade.

A contração depende muito da matéria prima e das misturas presentes nela, com isso, a ThermoBlend (2020) elaborou um estudo contendo alguns valores de provável contração em alguns polímeros. Nota-se que nesta análise não estão presentes resultados exatos e sim estimativas de contração para os polímeros e suas misturas. Um exemplo estudado é o material Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) que segundo a empresa pode variar de 0,7% em seu valor mínimo até 1,6% em seu valor máximo de contração, outro exemplo é o conhecido Polietileno Tereftalato (PET) que tem uma variação entre 0,2% e 3% entre contração mínima e máxima segundo o estudo da empresa.

Com estes dados, percebe-se a dificuldade em certos cenários para se alcançar algumas tolerâncias geométricas presentes em desenhos de produtos, pois a variação de contração em alguns casos pode ser relativamente grande perante a divergência aceitável presente nas cotas destes mesmos desenhos.

1.2. OBJETIVO GERAL

Comparar a contração de um produto polimérico considerando os resultados de uma simulação computacional e a peça física injetada.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) extrair informações de um molde já existente;
- b) avaliar projeto da peça que é injetada neste molde;
- c) avaliar resultados de simulação de deformação através de *software* de elementos finitos;
- d) comparar os resultados da simulação com o molde protótipo e o produto;
- e) avaliar a contração do produto injetado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado a revisão bibliográfica que auxilia no entendimento dos assuntos tratados nesse trabalho. Inicialmente são apresentados alguns pontos importantes para o projeto de um produto injetado. Após, são mostradas características técnicas de alguns materiais poliméricos, e o que estas podem afetar na contração do produto injetado.

2.1. PROJETO DO PRODUTO INJETADO

Segundo Catapan (2006), os produtos poliméricos injetados são alternativas econômicas, eficientes e precisas para a peças que necessitam de alta produtividade. Mas também acrescenta que o processo de desenvolvimento destes componentes é complexo, pois tudo se inicia em um projeto conceitual abstrato.

Após o projeto conceitual, inicia-se a etapa de projeto preliminar, onde Catapan (2006) cita ser a etapa que ocorrem modificações para que o produto possua manufaturabilidade, montabilidade e moldabilidade.

Harada (2004) introduz alguns questionamentos importantes a serem verificados para evitar inconvenientes nos produtos injetados, sendo estes descritos a seguir:

- a) É possível moldar o produto nas formas desejadas?
- b) Qual o material indicado para este produto?
- c) A conformação e a determinação das medidas deste produto são compatíveis com as exigências requeridas em sua aplicação?
- d) O método de modelagem é o mais conveniente para a forma e o material do produto?
- e) Relacionar o desenho do produto e os tipos de moldes mais apropriados
- f) Determinar o custo de acordo com a produção requerida.

De acordo com Harada (2004), a comunicação entre o projetista do produto, o projetista do molde e o técnico responsável pela transformação do polímero é importante para que se alcance um nível excelente na peça injetada.

2.1.1 Produtos injetados

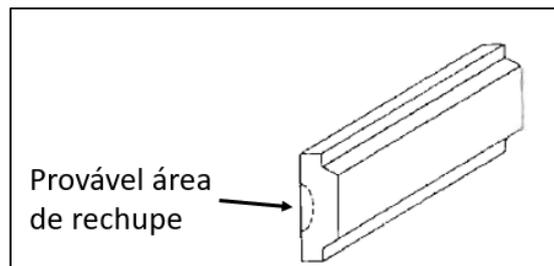
Harada (2004) cita a evolução que os produtos injetados tiveram, onde no início deste método de processamento, as peças eram limitadas ao peso de somente algumas gramas, e atualmente este limite passou a ser de cerca de 20 kg.

Com este aumento de tamanho e complexidade dos produtos poliméricos injetados, principalmente na variação de geometrias possíveis de serem feitas por este processo, surgiram algumas consequências, que se tornaram mais perceptíveis. Um dos principais fatores de atenção para seguir durante o projeto de um produto injetado é a espessura da peça.

De acordo com Almeida e Souza (2015), a variação de espessura de produto pode ocasionar os chamados rechupes ou chupamentos, ocasionados pela diferença de contração ao longo das variações no relevo da peça, observáveis quando a mesma é colocada em diferentes posições em relação ao observador.

A Figura 1 apresenta o conceito de projeto de uma peça onde há variação de espessura de parede, nas laterais a peça é mais fina que no centro. Essa mudança de espessura, acaba resultando em maior deformação na região onde o volume de polímero é maior.

Figura 1 - Área de rechupe

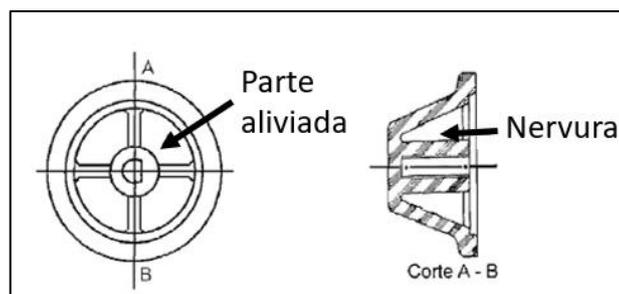


Fonte: Adaptado de Harada (2004)

Segundo Harada (2004) durante o desenvolvimento de uma peça polimérica que passará pelo processo de injeção, deve-se preferencialmente manter uma espessura de parede constante, e exemplifica uma solução para que não ocorram rechupes (Figura 2).

Para se manter a boa estrutura da peça nestes casos, ao invés de todo o espaço estar preenchido com polímero, foram criados apenas nervuras, mantendo assim a espessura uniforme e as características mecânicas do componente.

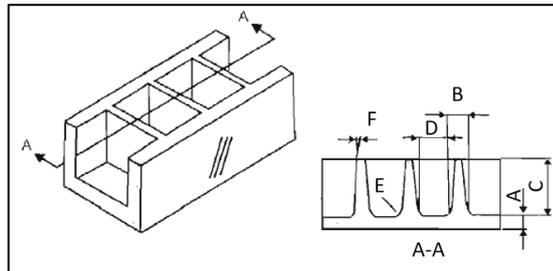
Figura 2 - Produto estruturado através de nervuras



Fonte: Harada (2004)

Para aplicar as nervuras ao projeto, ainda deve-se seguir alguns quesitos, Harada (2004) cita as Equações de 1 à 3 aplicadas à Figura 3 como um método para dimensionamento correto de nervuras em produtos moldados.

Figura 3 - Dimensionamento de nervuras



Fonte: Harada (2004)

A Equação 1 refere-se a espessura do produto no início da nervura.

$$B = 0,8. A \quad (1)$$

A Equação 2 refere-se a altura máxima da nervura para a espessura B do produto.

$$C = 3. B \quad (2)$$

A Equação 3 indica a distância mínima entre as nervuras.

$$D = 2. B \quad (3)$$

Além disso Harada (2004) indica que o raio do início da nervura E deve estar entre 0,10 e 0,15 mm, e o ângulo de extração F pode ser projetado entre 2° até $2,5^\circ$.

Aplicando alguns cuidados como o dimensionamento correto de nervuras e também a uniformidade da espessura das paredes durante o desenvolvimento do projeto, diminui-se as chances de marcas e problemas visuais e estruturais em peças poliméricas injetadas.

2.1.2 Tolerâncias de projeto de peças injetadas

Segundo Almeida e Souza (2015), as tolerâncias presentes em projetos de produto de peças poliméricas devem obrigatoriamente considerar a natureza do material termoplástico a

ser injetado, pois segundo os autores, cada polímero possui características que podem ser avaliadas por estudos reológicos do material e os resultados então, aplicados em correções de parâmetros no processamento do polímero.

As especificações de tolerância em desenhos de produtos são fundamentais para estabelecer limites dos desvios que sejam admissíveis quando comparado a medida nominal do projeto. Estas especificações são importantes principalmente para o processo produtivo da peça polimérica, mas também do molde de injeção.

De acordo com Oliveira e Donatelli (2015), é comum que em desenhos de produto, existam tolerâncias desnecessariamente apertadas. Com tolerâncias mal dimensionadas, podem haver custos desnecessários durante o projeto, tempo de desenvolvimento perdido ou até mesmo em situações onde necessite de retrabalho após o projeto pronto.

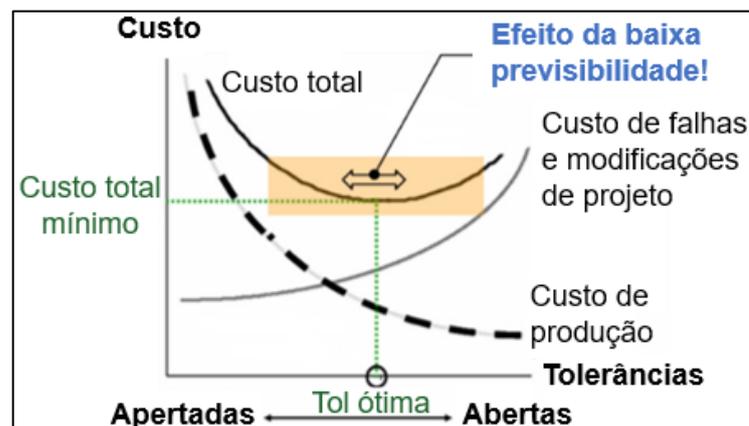
A Figura 4 mostra o efeito da tolerância sobre o custo total do projeto, além das variáveis que podem diminuir ou aumentar o mesmo.

O ponto de tolerância ótima ou ponto de equilíbrio, se refere a racionalização de custo e tempo de fabricação dos moldes, sem que a qualidade do produto final seja afetada a ponto de causar problemas para a utilização do mesmo.

A esquerda do ponto de equilíbrio, as linhas indicam maior custo de produção e maior custo total, mas ao mesmo tempo, esse efeito reflete em menores falhas ou retrabalhos do projeto, isso porque, a distância entre as medidas da peça física e o projeto seriam menores.

No lado direito do ponto, os custos de manufatura são menores, principalmente por não exigir equipamentos tão precisos, podem ser utilizados processos mais baratos e também menor tempo de desenvolvimento. Se algo for mal dimensionado, o custo total de fabricação do produto volta a se elevar, impulsionado pelo custo de retrabalho.

Figura 4 - Efeito da tolerância sobre o custo



Fonte: Oliveira e Donatelli (2015)

Oliveira e Donatelli (2015) também citam os problemas durante a inspeção de peças com tolerâncias mal dimensionadas, que dificilmente trarão um resultado confiável de aprovação ou reprovação de um produto.

A norma DIN 16742:2013 é uma das principais referências a ser seguida para especificações de tolerância de peças moldadas. Ela especifica alguns parâmetros de acordo com o tipo de material, processo de fabricação e de verificação, para que seja indicada através de alguns quesitos uma pontuação (P_g), e então a classificação para um grupo de tolerância (TG), como mostrado o Quadro 1.

Quadro 1 - Pontuação da tabela de tolerâncias

TG	TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6	TG7	TG8	TG9
P_g	1	2	3	4	5	6	7	8	≥ 9

Fonte: Norma DIN 16742:2013

A pontuação (P_g) é encontrada através da Equação 4, apresentada abaixo:

$$P_g = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (4)$$

Os valores de P_1 a P_5 são definidos através dos seguintes parâmetros:

P_1 = Processo de produção;

P_2 = Dureza do polímero injetado;

P_3 = Contração do molde;

P_4 = Consideração das diferenças de contração devido à geometria e ao processo;

P_5 = Série de tolerâncias.

O Anexo A apresenta as informações que indicam os desvios aceitos seguindo a norma DIN 16742:2013, para cada grupo e para cada dimensão a ser medida.

A DIN 16742:2013 também menciona os pontos ideais para que sejam postas tolerâncias nos desenhos, como em regiões funcionais, de montagem entre componentes ou pontos de fixação, também apresenta critérios neste sentido para diâmetros entre outros casos de projetos de produtos poliméricos moldados.

Embora esta norma sirva como base para controle de medida em peças moldadas, ela não contém valores específicos para a grande variedade de misturas poliméricas utilizadas para fabricação destes tipos de componentes. Deve-se considerar um estudo das propriedades de

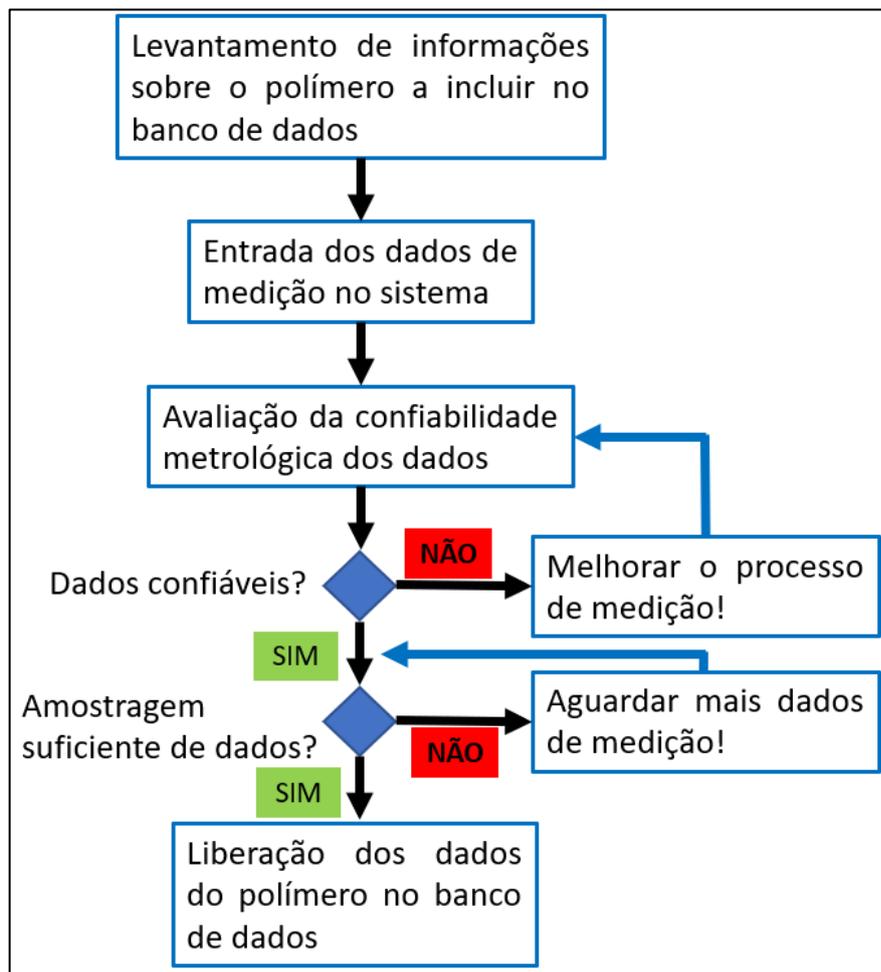
cada material para ter maior precisão e assertividade nas indicações de tolerâncias em desenhos, como também indicado por Almeida e Souza (2015).

Oliveira (2017) apresenta uma alternativa à norma DIN 16742:2013 para especificações de tolerâncias dimensionais de produção de peças plásticas. O método trata-se de um banco de dados históricos de medição de produtos injetados, que pode ser consultado durante as etapas iniciais do projeto do produto.

O autor propõe que para os dados a serem utilizados, alguns quesitos de similaridade de casos devem ser seguidos. Para isso foi utilizado o critério de pontuação da norma DIN 16742, que diz que duas peças são consideradas similares quando apresentam a mesma pontuação individualmente para as condições P_1 , P_2 , P_3 , P_4 e P_5 , citadas anteriormente.

Assim, os dados relacionados a cada peça são armazenados juntamente com os dados de peças similares já cadastrados, tornando o método mais preciso com o passar do tempo. Isso é feito seguindo o fluxograma na Figura 5.

Figura 5 - Processo de aquisição de dados



Fonte: Adaptado de Oliveira e Donatelli (2015)

Nota-se a importância de que desde o início do projeto de uma peça injetada, sejam levadas em consideração facilidade de fabricação do molde, estudo sobre o material polimérico a ser utilizado e também a introdução de tolerâncias dimensionais mais apropriadas e bem avaliadas em desenhos de produto.

2.2. DEFORMAÇÕES EM PEÇAS INJETADAS

As deformações dos mais variados tipos de materiais podem ser provocadas pela alteração de sua temperatura. De acordo com Philpot (2013), a maioria dos materiais se expandem ao serem aquecidos e se contraem quando resfriados. A Equação 5 mostra como é calculada a deformação térmica (ε_T) de um corpo.

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T, \text{ onde:} \quad (5)$$

α é o coeficiente de expansão térmica e ΔT é a variação de temperatura.

No processo de injeção de polímeros, o material é injetado em estado líquido, e pouco tempo depois, ele resfria até seu estado sólido, para poder ser desmoldado. Nesta mudança de fase provocada pela mudança de temperatura do polímero, ocorre a contração das peças injetadas.

2.2.1 Contração

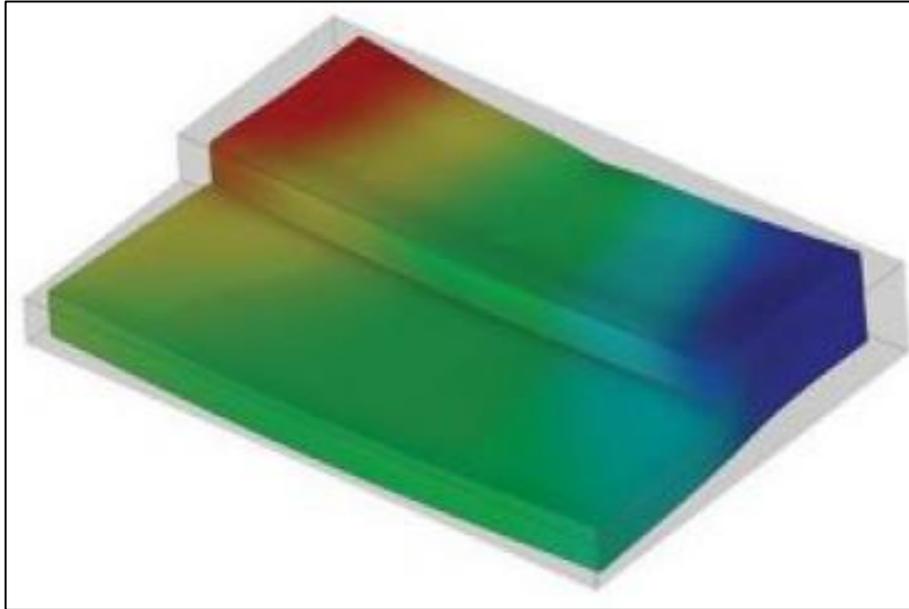
Almeida e Souza (2015) descrevem o efeito de contração como a variação de volume das peças injetadas em relação as dimensões do molde.

Segundo Harada (2004) a contração é importante, pois afeta as dimensões do produto moldado além de influir em alguns itens como a solidez da peça e as tolerâncias dimensionais.

A Afinko Soluções em Polímeros (2019) menciona a estrutura cristalina do polímero como a grande responsável pelo efeito de contração, em geral, o material que possui maior cristalinidade, possui também maior contração após o processamento.

A Figura 6 exemplifica o que acontece com as peças moldadas durante a injeção. A geometria com cores em tons de azul e vermelho, é o produto final após a contração, e a geometria com transparência é a geometria de projeto.

Figura 6 - Efeito de contração



Fonte: ThermoBlend (2020)

A Figura 6 também apresenta diferenças notáveis entre o produto do modelo e o produto final, para que isto não aconteça algumas ações podem ser tomadas, a primeira delas é definir o valor da contração do polímero ou mistura que será injetado, geralmente este dado é enviado pelo fornecedor da matéria prima, pois na maioria das vezes, cada fornecedor possui sua própria formulação para a mistura. A Tabela 1, apresentado por Harada (2004), indica alguns valores de referência para polímeros utilizados no processo de injeção.

Tabela 1 - Valores de contração

(Continua)

Materiais	Abreviaturas	% de contração
Acetato de Celulose	CA	0,3 - 0,7
Acetato - Butirato de Celulose	CAB	0,2 - 0,5
Poliamida (Náilon)	PA	1,0 - 2,5
Cloreto e Polivinila (Rígido)	PVC	0,1 - 0,2
Cloreto e Polivinila (Flexível)	PVC	0,2 - 2,0
Metilmetacrilato	PMMA	0,2 - 0,8
Poliestireno	OS	0,2 - 0,6
Acrilonitrila - Butadieno - Estireno	ABS	0,3 - 0,8
Acrilonitrila - Estireno	SAN	0,2 - 0,5

(Conclusão)

Polietileno Baixa Densidade	PEBD	1,5 – 3,0
Polietileno Alta Densidade	PEAD	1,5 – 3,0
Polipropileno	PP	1,5 - 2,5
Policarbonato	PC	0,5 - 0,7
Polioximetileno (Acatal)	POM	2,5

Fonte: Harada (2004)

Os valores para contração da tabela anterior são definidos em testes e situações ideais, mas segundo a Afinko Soluções em Polímeros (2019) alguns fatores podem influenciar para resultados finais diferentes do esperado, como a temperatura do polímero durante a injeção maior do que a adequada, e também baixas ou altas pressões de injeção ou recalque.

A Figura 7 mostra o que acontece nos casos em que a contração, ou o controle dos parâmetros do processo de injeção não são bem dimensionados.

Figura 7 - Dimensionamento do valor e controle da contração



Fonte: ThermoBlend (2020)

As diferenças entre a caixa da esquerda e a caixa da direita na Figura 7 são facilmente identificadas. Os problemas presentes na caixa da esquerda como deformações e até mesmo partes quebradas são situações que podem acontecer caso algum dos parâmetros do processamento do polímero não estejam de acordo com o requerido para a fabricação. Cada tipo de produto injetado exige um parâmetro específico decorrente de sua própria geometria, do projeto do molde, da máquina injetora entre outras variáveis.

Para o ajuste do processo, os valores iniciais são os que a simulação de injeção indica, porém na prática é muito raro que estes resultados sejam confiáveis o bastante para que não sofram alteração, como por exemplo, para que a contração fique de acordo com o estipulado.

2.2.2 Cálculo de contração

A Equação 6 utilizada para o cálculo de produtos moldados é definida por Almeida e Souza (2015) como:

$$D = P + S, \text{ onde:} \quad (6)$$

D é a dimensão final do molde em mm;

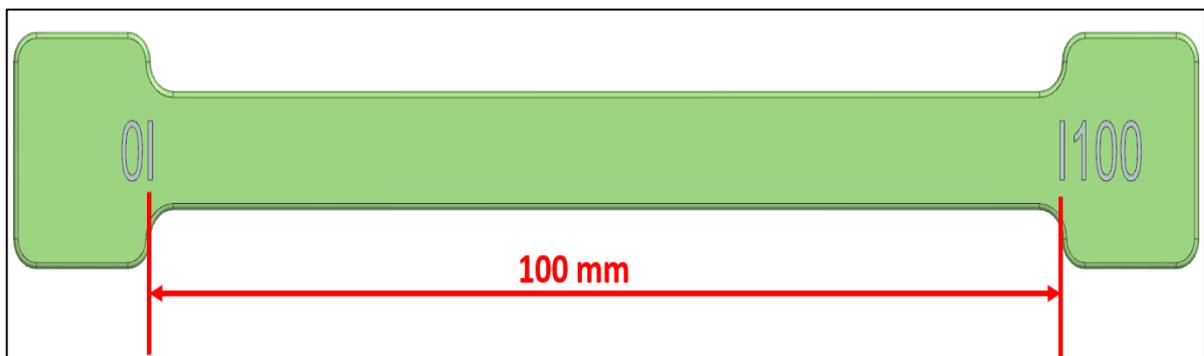
P é a dimensão do produto em mm;

S é o valor da contração (calculado a partir da porcentagem de contração).

As checagens iniciais da contração são feitas através das medidas das cotas de contração, que são pequenos detalhes no produto em partes não visíveis ao consumidor final, mas que servem como referência para o fabricante. É importante ressaltar que as cotas de contração nem sempre estão presentes nas peças injetadas.

A Figura 8 apresenta a medida de um ponto a outro em um produto, com valores de referência que devem ser encontrados caso todos os parâmetros de injeção e os valores de contração do polímero estejam corretos. Segundo a norma ASTM D955-00, aferições de medidas em produtos injetados devem ocorrer somente depois de ao menos 24 horas do processamento do polímero.

Figura 8 - Cota de contração no produto

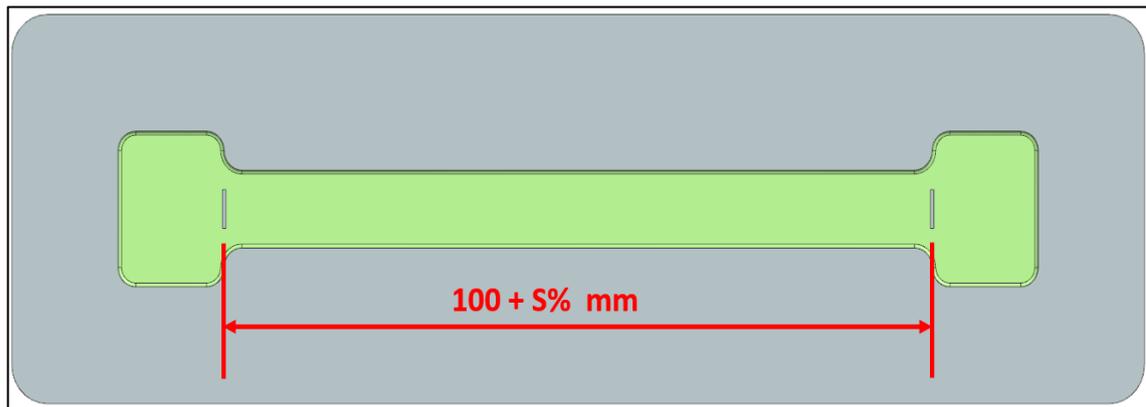


Fonte: O autor (2022)

Mas para que esta medida seja alcançada no produto moldado, a distância entre os detalhes no molde devem ser maiores, visto que ao esfriar, o produto ficará menor.

A Figura 9 apresenta o mesmo detalhe da Figura 8, porém indicando o valor nominal acrescido da contração S .

Figura 9 - Cota de contração no molde



Fonte: O autor (2022)

Através dos valores extraídos das cotas de contração, é verificado se o projeto do molde está de acordo com a contração definida para o polímero utilizado. Mas também podem ser ajustados conforme a necessidade, os parâmetros de injeção que influenciam na dimensão final da peça moldada.

2.2.3 Fatores que podem influenciar na contração

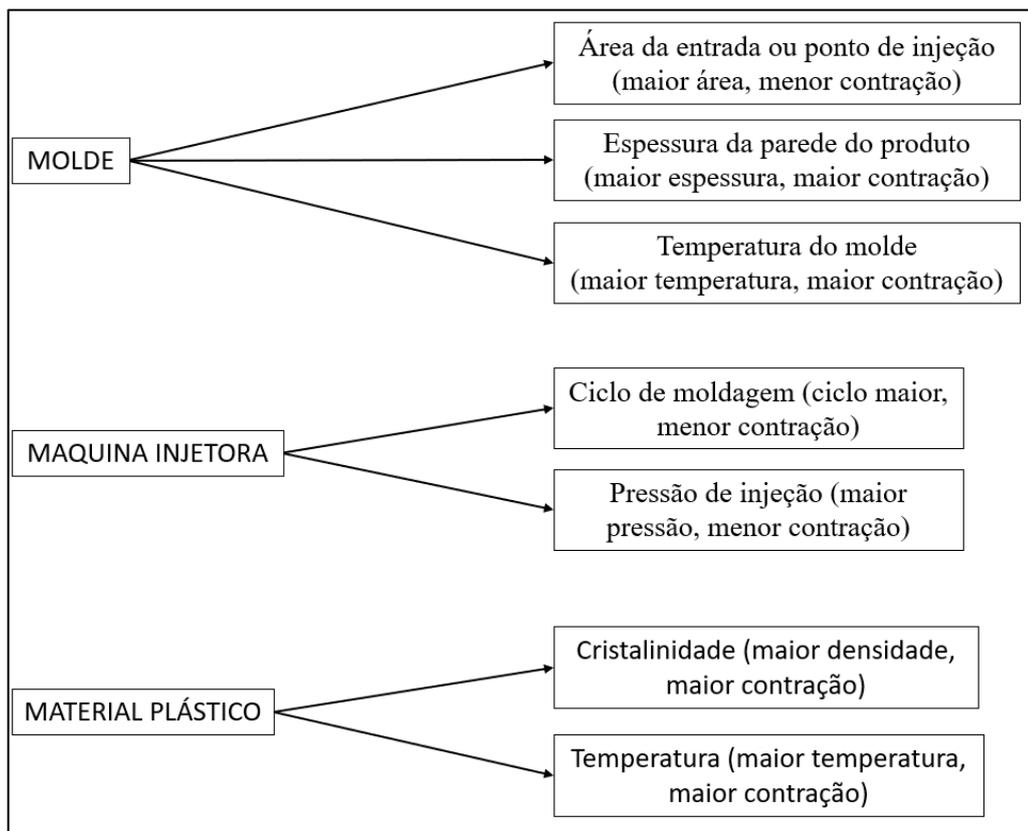
Harada (2004) cita a contração como uma característica dos materiais poliméricos que quando são postos em temperaturas mais baixas a que já estão, se contraem. O resultado é um produto final menor do que o molde original. O autor também cita alguns parâmetros que diminuem a contração das peças injetadas, são eles: diminuir a temperatura do material moldado, aumentar a pressão de injeção, reduzir o limite de carga a ser injetada, reduzir a temperatura do molde, aumentar o tamanho da entrada da cavidade, aumentar o tamanho do bico, colocar entradas múltiplas, aumentar o tempo de avanço, aumentar a velocidade de injeção, aumentar o tempo do molde fechado e aumentar a saída de ar da cavidade.

Para Oliveira (2017) há uma grande dificuldade para prever os valores precisos de contração de um polímero, visto que existem outras variáveis no processo que influenciam para este resultado, sendo estas as prováveis causas dos desvios dimensionais das peças poliméricas

injetadas. O autor exemplifica parâmetros do processo como temperaturas, pressões e restrições das cavidades como principais fatores, mas também inclui fatores como a secagem da matéria prima antes da produção e até mesmo o grau de cristalinidade do material.

Buscando mapear os fatores que originam e que podem mudar o valor da contração, Harada (2004) apresenta a Figura 10.

Figura 10 - Origem dos fatores que influenciam na contração



Fonte: Harada (2004)

Com isso, o autor direciona o que cada ponto no processo, na matéria prima e também no projeto do molde influenciam no tamanho final da peça.

2.2.4 Análise dimensional de produtos injetados

O processo de injeção de polímeros é aplicado quando os produtos a serem fabricados possuem geometrias complexas, que exigem melhor acabamento e precisão dimensional, mas isso acaba diretamente dificultando o processo de verificação metrológica destes produtos.

Oliveira (2017) cita que a medição de peças poliméricas injetadas é influenciada pelas características geométricas e pelas propriedades da matéria prima utilizada, o que requer

cuidados especiais para garantir confiabilidade nos resultados e diminuir incertezas de medição. O autor através do Quadro 2, elencou as principais dificuldades durante as análises metrológicas deste tipo de componente e os motivos destes problemas.

Quadro 2 - Dificuldades metrológicas

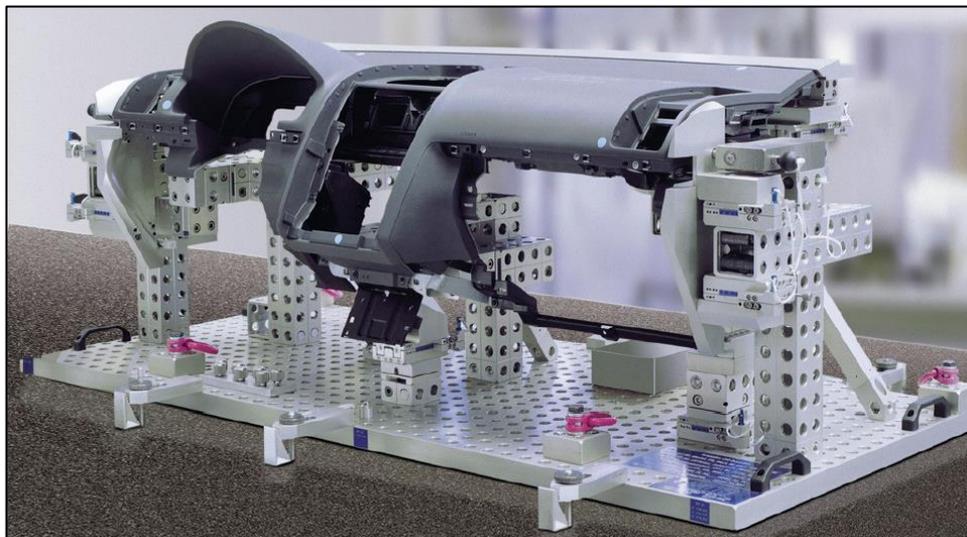
Características típicas de produtos injetados	Dificuldades para					
	Fixar a peça	Acessar e extrair pontos de medição	Processar dados	Atender metas	Climatizar	Representar tolerâncias no desenho
Flexibilidade mecânica	x	x		x		x
Ângulos de saída	x	x				x
Superfícies de forma livre	x		x			x
Instabilidade dimensional devido a temperatura				x	x	
Locais de referência em superfície deslocada	x		x			x
Elementos pequenos	x	x		x		

Fonte: Adaptado de Oliveira (2017)

A fixação dos produtos moldados é uma das principais dificuldades para o processo de medição, a espessura costuma ser muito fina, tornando as peças muito flexíveis, e consequentemente tornando a fase de medição inviável nestes casos.

Oliveira (2017) traz como alternativa apresentada na Figura 11 os gabaritos, que são estruturas feitas para fixar a peça em determinados locais como em pontos de montagem, e de alinhamento com outros componentes.

Figura 11 - Sistema de fixação para medição



Fonte: Oliveira (2017)

Oliveira (2017) complementa que apesar destes dispositivos de fixação contribuírem para a rigidez do componente, eles podem dificultar ainda mais o acesso dos equipamentos de medição como apalpadores ou paquímetros por exemplo. Então recursos como escaneamento de nuvem de pontos são utilizados para comparar modelos que partem de peças já injetadas com o projeto original.

Segundo Oliveira (2017), equipamentos como o *scanner*, permitem a utilização de recursos de software como o *Best Fit*, que se refere ao melhor alinhamento entre o projeto e a nuvem de pontos, e também o alinhamento por pontos de referência (RPS) que possibilitam a determinação de um sistema de referência para a medição das peças injetadas, como algumas vezes acontece em componentes da linha automotiva, em que o cliente solicita coordenadas de medição partindo de um ponto específico do carro, e não da peça em si.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição dos métodos e dos materiais utilizados para a realização dos experimentos. O estudo em questão trata-se da validação da contração de materiais poliméricos injetados.

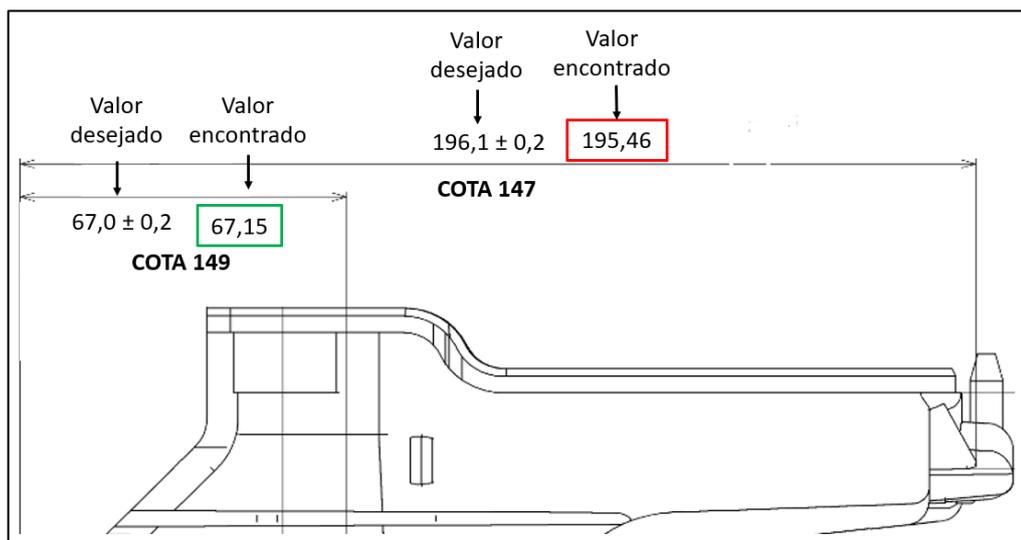
3.1. ESTUDO DE CASO

Problemas relacionados a deformação em peças injetadas são frequentes, oriundos de várias causas, resultando em diferentes efeitos ao final da produção. Alguns destes problemas, podem ser amenizados, durante o processo, ou durante o desenvolvimento do projeto da peça ou ferramenta.

A Figura 12 apresenta parte de um desenho de produto, onde foram realizadas análises metrológicas para verificação de uma peça injetada que compõem a montagem da caixa do rotor do ar-condicionado de um carro.

A medida encontrada na COTA 147 na peça injetada não obedece a tolerância estipulada pelo desenho do produto, já a medida da COTA 149 está de acordo com o solicitado pelo desenho.

Figura 12 - Desenho de Produto



Fonte: O autor (2022)

Como a COTA 147 apresenta distância maior entre os pontos de medição em relação a COTA 149, já é esperado uma divergência maior entre modelo projetado e o produto injetado,

pois a contração volumétrica é maior com maiores volumes. O problema de casos como esses é que os desenhos de produtos apresentam normalmente a mesma margem para desvios em medidas tão diferentes como essa.

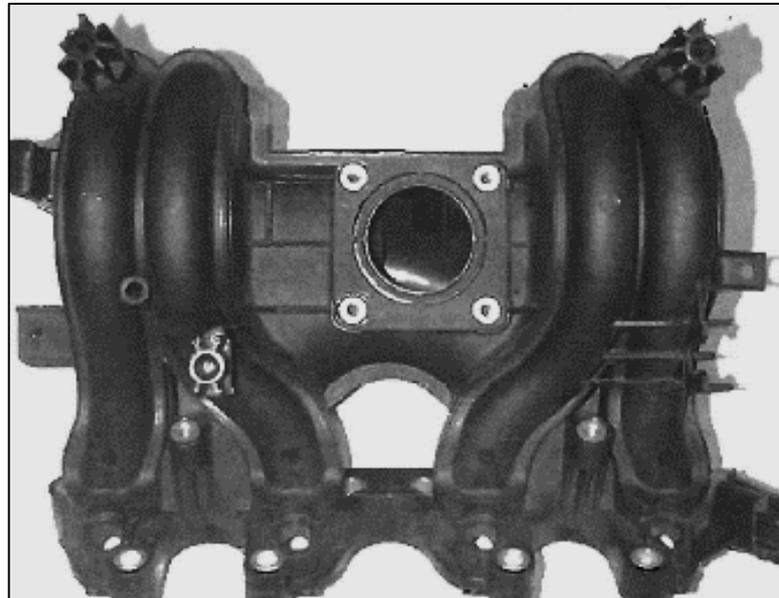
Durante o processo de análise metrológica desta peça, ela não continha nenhum sistema de fixação, então foi solicitado ao cliente a fabricação deste componente para tentar aproximar as medidas aferidas das medidas nominais. Sabendo que os custos de produção de dispositivos como esse são altos, geralmente opta-se por não fazer, e foi o que aconteceu neste caso.

Ciente do problema, foram medidas todas as cotas que os desenhos solicitavam e encaminhado os resultados ao cliente, mesmo sabendo que a maioria não atendia a tolerância exigida, principalmente pelo fato de não haver o gabarito para fixação.

Para aprovação foi realizado uma montagem com todas os componentes envolvidos no sistema de ar-condicionado do carro, verificando se as folgas entre as peças estavam aceitáveis e não causaria vazamentos excessivos nos dutos de ventilação do carro.

Estas deformações excessivas ocorrem principalmente em peças injetadas grandes e com pouca estrutura como para-choques de carros, mas também pode-se encontrar em peças menores, mas com geometria complexa, como é o caso da Figura 13.

Figura 13 - Produtos que apresentam deformação nos pontos de fixação



Fonte: Harada (2004)

O modelo de produto apresentado na Figura 13 possui uma geometria muito complexa e difícil de ser reproduzida mesmo por processos mais refinados de produção, como é o caso da injeção de polímeros.

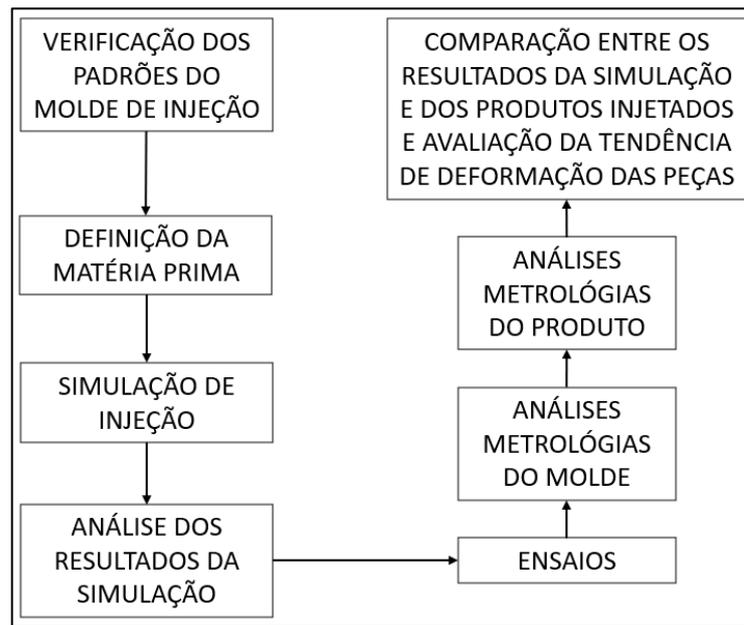
Em casos como esse, o controle da contração é prejudicado pela quantidade de nervuras e detalhes que a peça possui, não permitindo com que a espessura seja uniforme, fazendo com que a contração volumétrica em certas regiões seja maior e cause deformações em toda a peça, principalmente nas medidas máximas do componente.

3.2. MODELO DE ESTUDO

Nesta etapa, é feita a definição do produto a ser injetado juntamente com o molde, também as etapas de projeto e estudos para extrair informações de parâmetros de processo em *software* de análise de elementos finitos.

A Figura 14 apresenta o fluxograma de atividades que serão realizadas, para que a proposta do trabalho de estudo da contração de produtos poliméricos e a confiabilidade em *softwares* de simulação de injeção sejam alcançadas.

Figura 14 - Fluxograma de atividades



Fonte: O autor (2022)

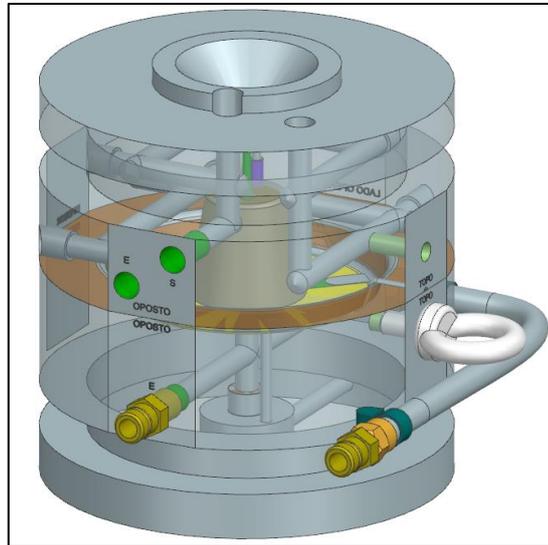
3.2.1 Molde de injeção

O molde de injeção utilizado para o ensaio será uma ferramenta já modelada e criada por Trentin (2020).

O objetivo da utilização deste molde é dar continuidade ao trabalho já iniciado, porém adaptado ao novo assunto, visto que o produto que será injetado apresenta geometria simples,

mas também minimizar os custos com projeto, compra de material e usinagem dos aços. A Figura 15 mostra a ferramenta de injeção que será utilizada para os ensaios.

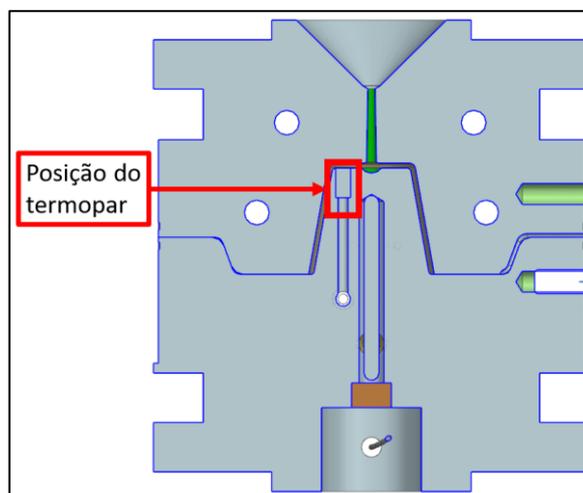
Figura 15 - Molde de injeção utilizado no ensaio



Fonte: O autor (2022)

O projeto contempla um alojamento para montagem de um termopar, como mostra a Figura 16. Esse dispositivo auxilia na verificação da temperatura interna do molde em uma região próxima ao polímero durante o processo de injeção. Este é um importante dado que serve como base de comparação entre os resultados das análises de elementos finitos e a situação real do molde em máquina.

Figura 16 - Posição do termopar



Fonte: O autor (2022)

3.2.2 Produto injetado

Este molde tem como produto algo similar a um copo, como mostrado na Figura 17. O polímero utilizado para o ensaio é uma mistura de polipropileno (PP) com fibra. De acordo com a Harada (2004), o polipropileno possui contração de 1,5% à 2,5%, então percentuais próximos a estes são esperados. Este valor de contração pode mudar dependendo do fornecedor da matéria prima.

Figura 17 - Produto injetado

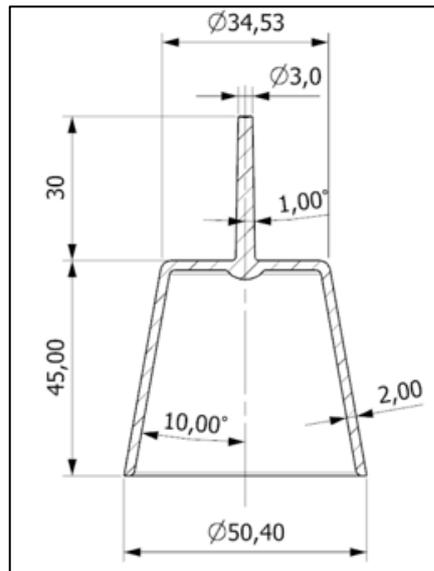


Fonte: O autor (2022)

O desenho do produto é apresentado na Figura 18, e sua geometria é considerada pequena, então nestes casos, a contração numérica apresenta menores valores, consequentemente os desvios dimensionais após o processo de injeção tendem a ser menores também.

Exemplificando a situação de que se a peça fosse maior, as variações de contração quando se fala em medidas absolutas seriam maiores visto que o volume do produto aumentaria. Também poderia ocorrer uma diferença mais perceptível se a geometria fosse mais complexa, com nervuras internas, regiões vazadas e variações significativas de espessura de parede. Esses fatores tornam o processo de injeção mais sensível a alterações no processo e também as especificações escolhidas durante a etapa de projeto do molde.

Figura 18 - Desenho do produto protótipo

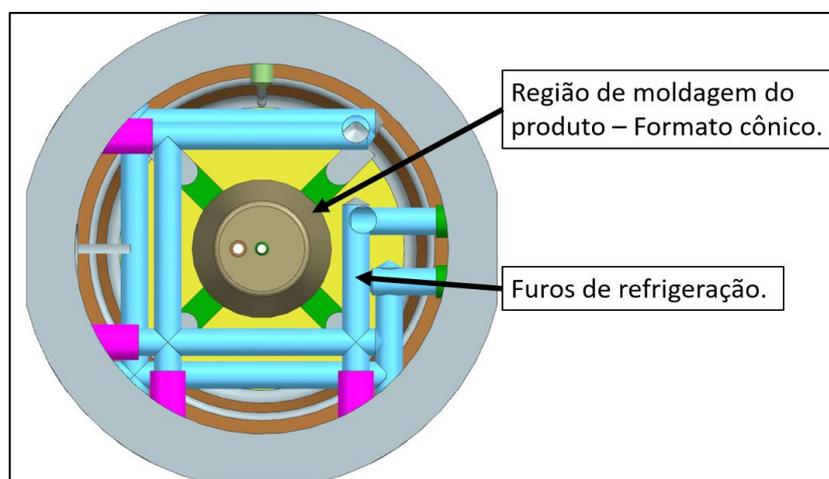


Fonte: Adaptado de Trentin (2020)

Com as peças produzidas no ensaio, o objetivo é encontrar a tendência para os valores de contração dos produtos injetados de cada lote, analisando os resultados entre as simulações e as peças injetadas, que pode ser facilmente comparado por medidas de maneira similar ao que é apresentado na Figura 21, mas em pontos das peças, como a medida do maior diâmetro e a altura do copo.

Algo importante a ser observado é a uniformidade da deformação, visto que os canais de refrigeração do molde não acompanham perfeitamente a superfície do produto, como mostrado na Figura 19. Fatores como esse podem causar deformidades como uma geometria não cônica no caso deste produto.

Figura 19 - Refrigeração da região do produto



Fonte: O autor (2022)

3.3. FATORES ANALISADOS E PARÂMETROS INICIAIS

O objetivo deste estudo é avaliar as variações dimensionais de um produto polimérico que passou pelo processo de injeção. Como já mencionado em tópicos anteriores, várias são os fatores que podem causar variação no valor da contração do polímero, desde escolhas de desenvolvimento do molde, e durante a fabricação da peça injetada como a temperatura do molde por exemplo.

Para esta avaliação foi usado como variável a pressão de injeção, pelo fator de que é um parâmetro que muitas vezes é facilmente alterado para mudar características do produto injetado. Todos os outros parâmetros foram mantidos inalterados durante todo o ensaio, fazendo com que os resultados indiquem os efeitos que a alteração de somente um fator faz com o produto final, que neste caso será o tamanho da peça.

3.4. SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO

As análises de simulação de injeção, com parâmetros da matéria prima, e canais de entrada do polímero no molde são realizadas em *softwares* de elementos finitos como o Autodesk MoldFlow® ou recursos como os módulos de simulação do Siemens NX®.

Na maioria dos casos estes softwares possuem em sua biblioteca de materiais os polímeros que são encontrados comercialmente para utilização no processo de injeção, caso isso não aconteça, é possível indicar as características do polímero e fazer a simulação desejada. Neste caso como foi utilizado o polipropileno Daplen EH119HP da fabricante Borealis, o mesmo foi encontrado o material na biblioteca do software de simulação. As principais propriedades físicas deste produto da Borealis estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas do polímero Daplen EH119HP

Propriedade	Valor	Método de teste
Densidade	970 Kg/m ³	ISO 1183
Índice de fluidez (230 °C/2,16 kg)	33 g/10 min	ISO 1183
Tensão de escoamento (50 mm/min)	17 Mpa	ISO 527-2
Módulo de flexão (2 mm/min)	1450 Mpa	ISO 178
Temperatura de deflexão de calor (1,80 Mpa)	47 °C	ISO 75-2
Coefficiente de expansão térmica (-30 °C / 80 °C)	67 µm/mK	Método Borealis

Fonte: Borealis (2022)

A proposta desta simulação é encontrar parâmetros de injeção para serem aplicados na máquina injetora, sem que o polímero seja degradado ou invalide o ensaio, ou seja, trabalhar na condição ideal de máquina, ferramenta e matéria prima.

Como base para valores iniciais de utilização para processamento do polímero Daplen EH119HP, foram utilizados alguns dados que o manual do material indica. Isso é mostrado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Parâmetros recomendados para injeção

Temperatura do polímero	220 – 260 °C
Temperatura do molde	30 – 50 °C
Pressão de injeção	30 – 60 Mpa
Velocidade de frente de fluxo	100 – 200 mm/s

Fonte: Borealis (2022)

Com os dados da Tabela 3, foram realizadas as simulações de injeção para este estudo, e definido a mínima condição de preenchimento da cavidade pelo material polimérico, ou seja, o ponto entre retirar o produto completo ou não completo da injetora. Nesta simulação, as definições da Tabela 4 foram utilizadas:

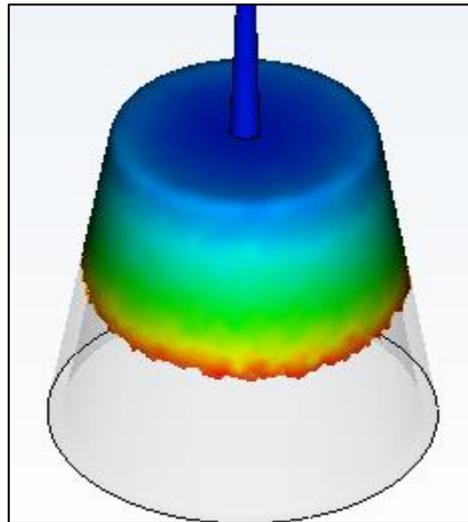
Tabela 4 - Parâmetros definidos para a simulação e ensaio

1ª Pressão de injeção	19 bar (ensaio) / 22 bar (Simulação)
2ª Pressão de injeção	38 bar
3ª Pressão de injeção	76 bar
4ª Pressão de injeção	190 bar
Tempo de injeção	3 segundos
Tempo de resfriamento	18 segundos

Fonte: O autor (2022)

Nota-se que na Tabela 4 a primeira pressão de injeção possui dois valores considerados. Isso aconteceu, pois, a mínima pressão de injeção suficiente para que a peça seja completamente preenchida durante o processo foi de 19 bar durante o ensaio, mas na simulação isso não acontece e a peça fica incompleta, como mostra a Figura 20, então foi preciso aumentar esse parâmetro para 22 bar e alcançar o resultado final de preenchimento total.

Figura 20 - Mínima pressão de injeção da simulação

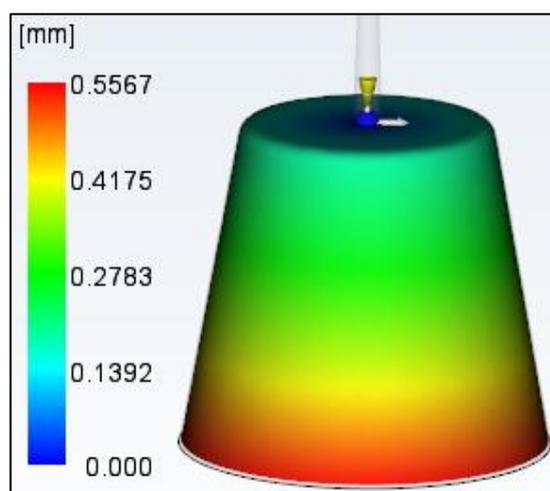


Fonte: O autor (2022)

Como a diferença entre mínimas condições de injeção para que o produto fique completamente preenchido no processo não é muito distante uma da outra, foram levados em conta ambos os valores. Mas também o principal fator é que, como na injetora utilizada para o ensaio não é possível utilizar qualquer valor, e sim uma fração da pressão máxima do equipamento, não foi possível utilizar os 22 bar, e somente os 19 bar. Caso fosse optado por não utilizar os 19 bar, o próximo valor possível só seria 38 bar, que foi utilizado como segundo valor de pressão do estudo.

O parâmetro a ser extraído da simulação de injeção com a variação destas pressões, e o principal a ser utilizado neste estudo é a deformação do produto injetado, como mostra o exemplo na Figura 21, que apresenta dados de deformação através da escala a esquerda.

Figura 21 - Deformação teórica de um produto injetado



Fonte: O autor (2022)

Nota-se que a medida entre o molde e a peça após a injeção para este caso variou cerca de 0,55 milímetros de cada lado da peça na extremidade do produto, segundo os resultados do *software*.

O resultado da deformação extraído do *software* de simulação serve como principal guia para definição de como será a geometria final da peça. Alguns autores propõem valores para a contração de certos polímeros, como mostra a Tabela 5, porém há divergências entre os resultados encontrados, impossibilitando que seja definido algum valor exato para o percentual de contração de cada material.

Tabela 5 - Contração de polímeros

Materiais	Abreviaturas	% de contração		
		Segundo Harada (2004)	Segundo Thermoblend (2020)	Segundo Moldpart (2011)
Acetato de Celulose	CA	0,3 - 0,7	0,3 – 1,0	0,5
Poliamida (náylon)	PA	1,0 - 2,5	0,7 – 2,0	1,3
Acrilonitrila-Butadieno-Estireno	ABS	0,3 - 0,8	0,7 - 1,6	0,8
Polietileno de baixa densidade	PEBD	1,5 – 3,0	1,5 – 2,0	1,5
Polipropileno	PP	1,5 - 2,5	1,6 – 3,0	1,7
Policarbonato	PC	0,5 - 0,7	0,6 - 0,9	0,7
Polioximetileno (Acetal)	POM	2,5	1,7 - 2,9	2,2

Fonte: O autor (2022)

3.5. ENSAIOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Polímeros (LPOL) da Universidade de Caxias do Sul (UCS) utilizando a injetora apresentada na Figura 22. Trata-se de um equipamento da marca Himaco de 80 toneladas de força de fechamento e 1900 bar de pressão máxima de injeção.

Para que a matéria prima utilizada para os ensaios mantivesse a qualidade de processamento desejada, foi utilizado uma estufa de secagem para o polímero, amenizando os

impactos causados pela umidade excessiva presente no material. Esse fator poderia causar problemas como manchas, bolhas de ar e outras dificuldades durante a injeção das amostras.

Como já citado anteriormente, essa injetora não permite estipular qualquer valor de pressão de injeção, somente frações da pressão máxima. Por exemplo, 1% da pressão máxima resultou em 19 bar, que foi utilizado como mínima pressão dos testes, 2% resultou em 38 bar, e assim por diante.

Figura 22 - Injetora utilizada para os ensaios



Fonte: O autor (2022)

Para a pressão de recalque, a mesma lógica de fração de pressão máxima é aplicada. Para o primeiro ensaio foi utilizado 50% da pressão máxima, ou seja 955 bar de pressão de recalque. Um segundo ensaio foi necessário para constatar a influência da pressão de recalque nas medidas finais da peça, e neste foi alterada a pressão de recalque para 35% da pressão máxima da máquina, sendo equivalente a 668,5 bar.

Os parâmetros utilizados no ensaio foram os já citados anteriormente, sendo que a maioria destes pode ser controlado pela própria injetora, não necessitando de um equipamento externo para controle e aferição ao longo do teste.

O único dado de entrada para o processo que não foi possível controlar com o equipamento de injeção foi a temperatura do molde. Para isso, o LPOL possui um dispositivo capaz de controlar a temperatura do liquido de arrefecimento que passa pelo molde, podendo deixa-lo mais frio ou mais quente conforme a necessidade.

Com este equipamento, foi possível manter a média de temperatura do molde a 47 °C durante os ensaios, como mostra o multímetro presente na Figura 23.

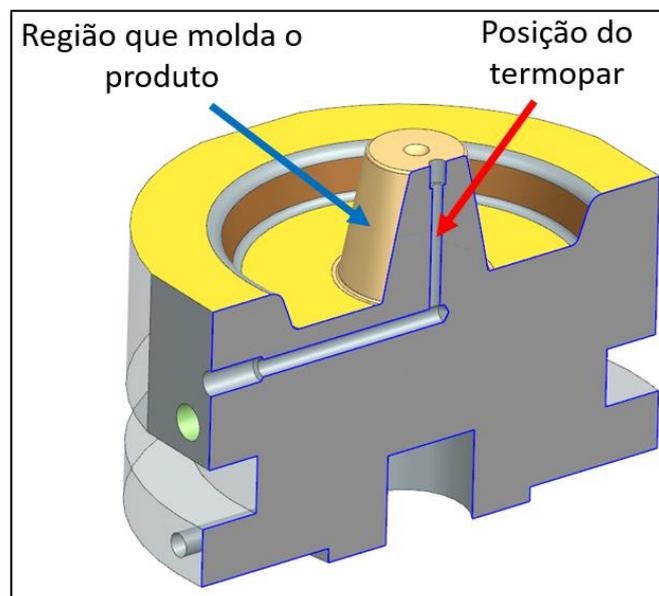
Figura 23 - Temperatura do molde durante os ensaios



Fonte: O autor (2022)

O multímetro apresentado na Figura 23 foi responsável pela leitura da variação da resistência elétrica gerada pelo termopar posicionado no interior do molde, onde é feita a aferição da temperatura da ferramenta. A posição do termopar é vista na Figura 24 e foi escolhida por ser na região próxima ao produto injetado. Essa parte do molde geralmente é uma das partes que mais aquece pelo fato de que o polímero é injetado em sua temperatura de fusão. Isso faz com que após alguns ciclos, todo o aço das cavidades aqueça até esta temperatura caso a refrigeração não seja eficiente para controlar esse parâmetro.

Figura 24 - Posição do termopar próximo à região de produto



Fonte: O autor (2022)

Com a temperatura do molde sempre próxima aos 47 °C foi possível extrair todas as peças durante o ensaio sem que o polímero fosse degradado pelo excesso de temperatura, e também sem que o produto fique manchado ou incompleto pela temperatura do molde estar muito baixa.

3.6. VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL

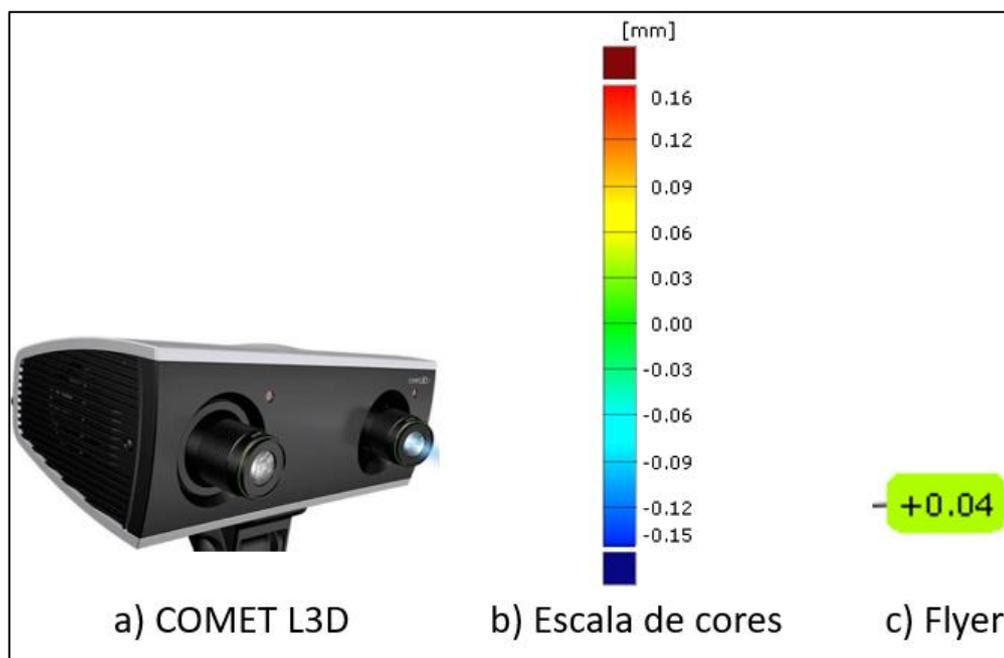
As peças injetadas passaram pelo sistema de medição por *scanner* pois esse método apresenta uma facilidade maior para a leitura dos dados. Neste estudo, foi utilizado o *scanner* COMET L3D da fabricante Zeiss (Figura 25a).

A verificação dos desvios é feita através de uma escala de cores como na Figura 25b. Mas também é possível adicionar os valores exatos de desvios em pontos específicos através dos *flyers* (Figura 25c), que são notas que mostram a diferença entre a peça atual e o projeto.

Também não foi necessário utilizar gabaritos ou métodos de fixação da peça, pois a leitura dos pontos de medição com este tipo de equipamento não exige toques na peça pelo fato de que o equipamento faz a varredura de toda superfície a distância, anulando o risco do componente se mover ou se deformando durante o processo.

Após a digitalização, o *software* gerou uma malha para que fosse realizada a comparação com o modelo teórico e verificado os desvios geométricos.

Figura 25 - Métodos para identificação de desvios



Fonte: O autor (2022)

Espera-se primeiramente que as medidas encontradas nas peças injetadas sejam similares ao que é calculado pela simulação de injeção, indicando que o ensaio foi realizado de maneira similar a simulação.

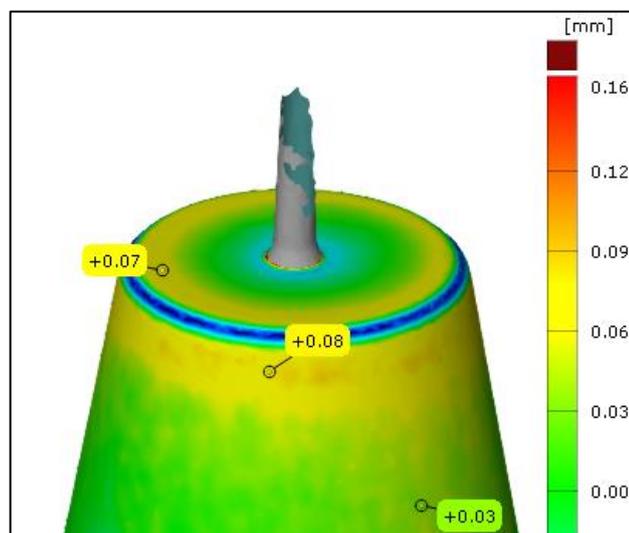
Com base nos resultados de medição das peças do ensaio, é possível definir um valor de tendência da deformação para este produto e para este polímero, podendo então avaliar se a contração ocorreu da maneira esperada, ou seja, similar ao que é dito por algum dos autores citados neste trabalho, ou se ainda outros valores foram observados para a contração.

3.6.1 Verificação dimensional do molde

Inicialmente não foram realizadas as aferições dimensionais do molde confiando de que a usinagem estava correta e também que os impactos do polimento fossem mínimos. Também não era possível identificar nenhum sinal de riscos, desencontros entre as cavidades fixa e móvel do molde ou algo que pudesse identificar a olho nu algo errado na geometria da ferramenta.

Porém, após o ensaio foram realizadas as primeiras medições das peças injetadas, e as medidas não condiziam com o esperado. Sabe-se que após o resfriamento, o produto deve ficar menor do que a cavidade, mas isso não aconteceu de forma uniforme, sendo que algumas regiões aparentavam estar próximas do planejado, já outras estavam totalmente diferentes, até com medidas maiores do que a cavidade fixa do molde como mostra a Figura 26, o que é contrário ao que a literatura cita.

Figura 26 - Verificação dimensional com produto desatualizado

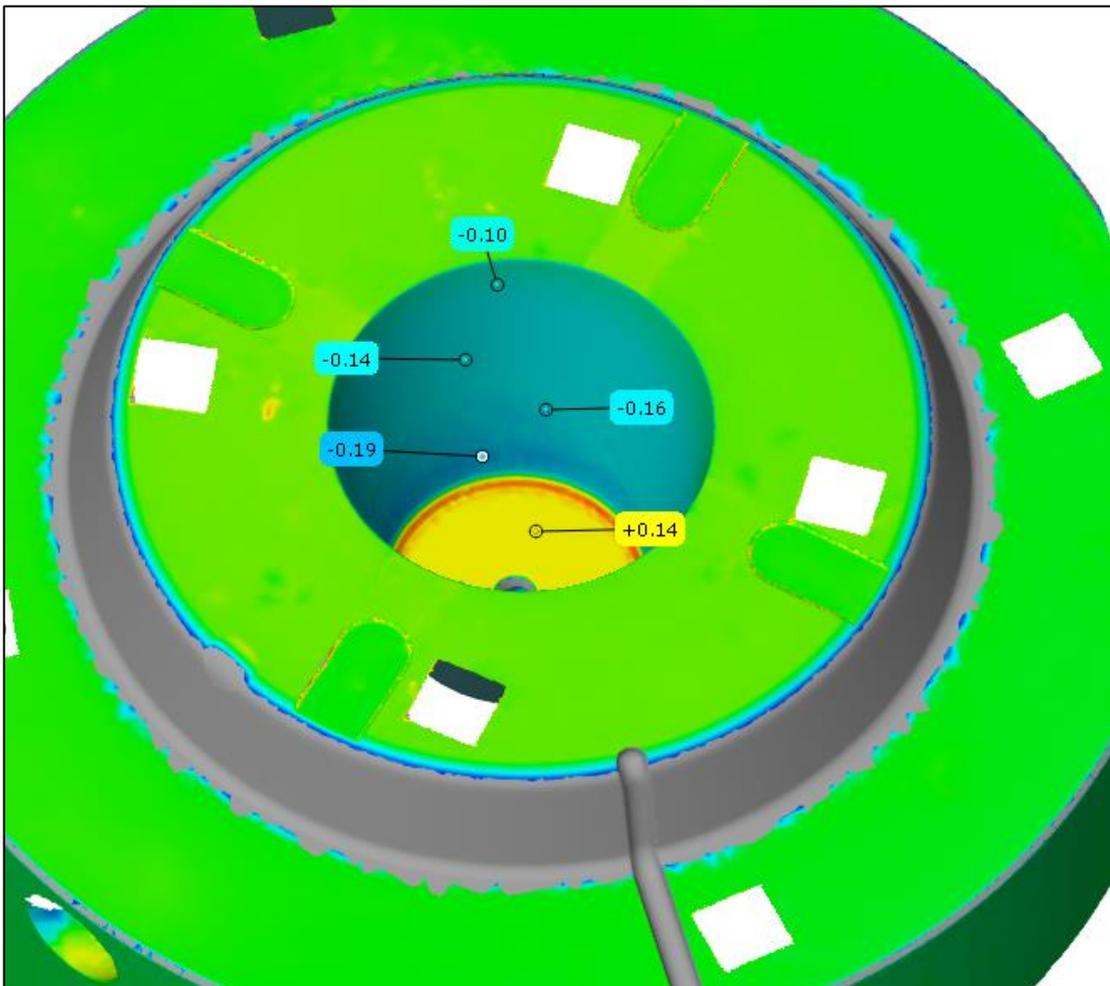


Fonte: O autor (2022)

Como o intuito principal deste estudo é descobrir variações dimensionais em decorrência da alteração de parâmetros de injeção, e também quantificar estas medidas, foram feitas análises metrológicas na cavidade fixa do molde e verificar se as variações inesperadas presentes no produto foram decorrência do processo ou se a usinagem e polimento da superfície de produto da cavidade estavam erradas.

O processo de medição foi realizado no laboratório de metrologia da empresa Aeromatrizes Indústria de Matrizes utilizando o *scanner* de medição que gerou a malha da superfície presente do molde para comparação. Nesta análise, como mostra a Figura 27, foram encontrados desvios de geometria na superfície de moldagem da ferramenta.

Figura 27 - Molde protótipo antes do ajuste



Fonte: O autor (2022)

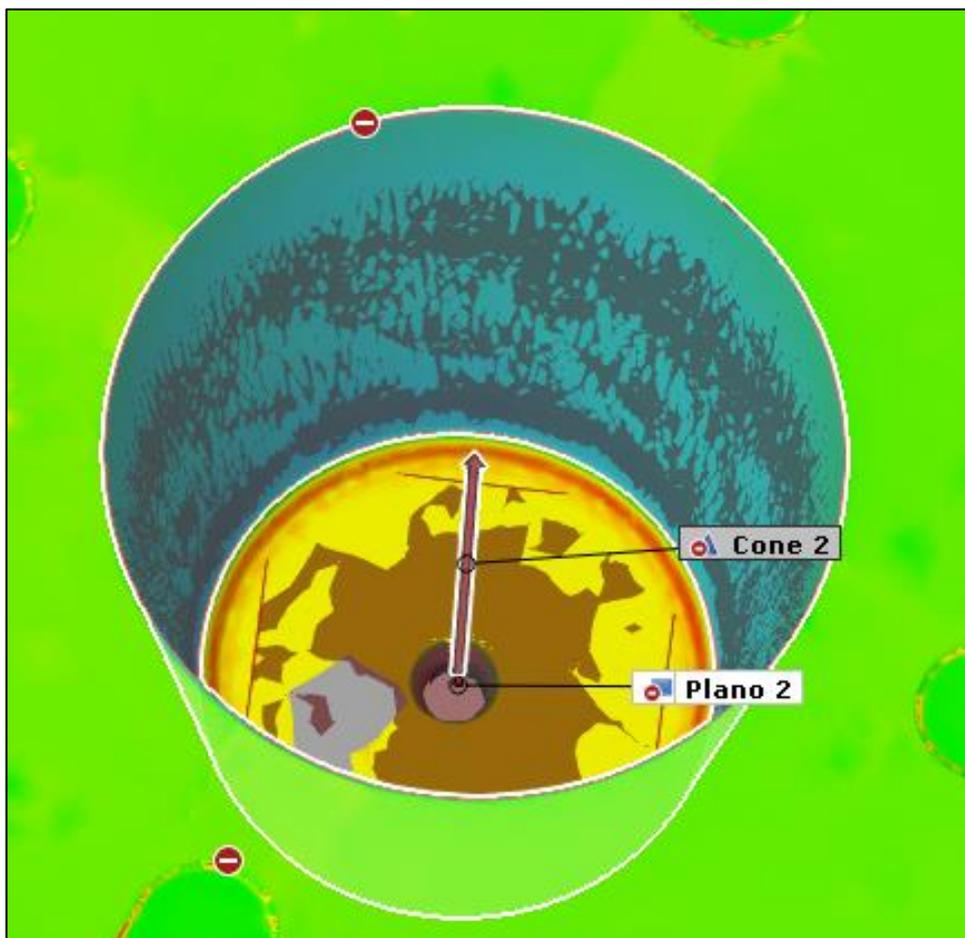
Os valores mostrados na Figura 27 são as medidas de desvio presentes na cavidade fixa em relação ao modelo original. Nota-se que, as paredes laterais que moldam o produto estão com valores negativos, ou seja, a usinagem e polimento removeram mais aço do que deveriam,

além de apresentar medidas diferentes de uma região até a outra, indicando que o ângulo do cone também não estava correto. O ponto que apresenta valor positivo indicou que no fundo da cavidade a área de moldagem apresentou excesso de aço.

Com isso, foi preciso atualizar o modelo do projeto para que fique de acordo com as medidas atuais do molde, mas como o processo de polimento é feito de forma manual, representar a superfície de maneira exata é algo praticamente impossível quando é exigido tolerâncias próximas a 0,02 ou 0,03 mm.

Então o método para melhor identificar a nova superfície do molde foi utilizar o próprio software de medição, que possui ferramentas de auto detecção de geometrias, se ajustando automaticamente da melhor maneira possível às superfícies atuais, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Detecção automática de superfícies

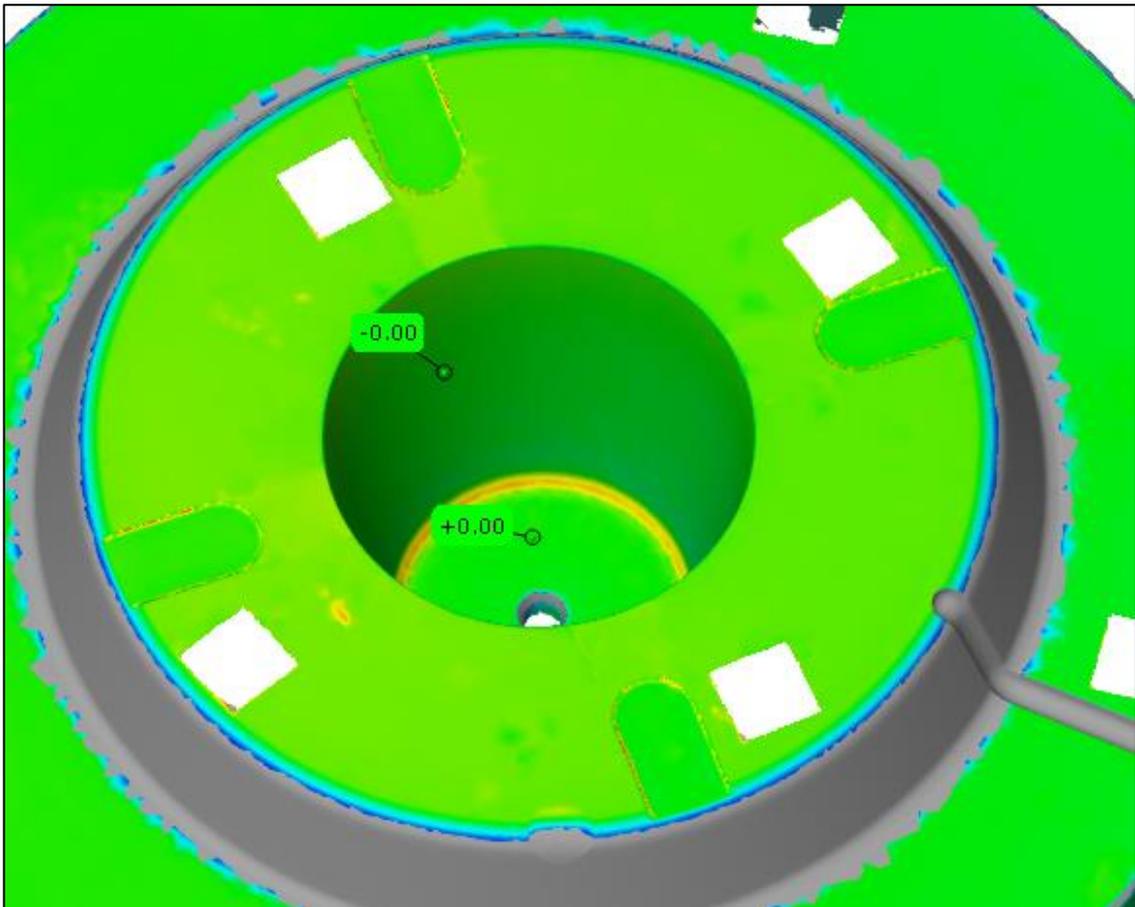


Fonte: O autor (2022)

Com as novas superfícies geradas a partir da malha digitalizada da cavidade, foi possível atualizar tanto o modelo matemático da própria cavidade fixa, como também o modelo matemático do produto injetado.

Após essa atualização, foi realizado mais uma comparação metrológica da cavidade fixa para conferir se tudo foi realizado de forma correta. O resultado desta análise está apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Molde protótipo após o ajuste do modelo



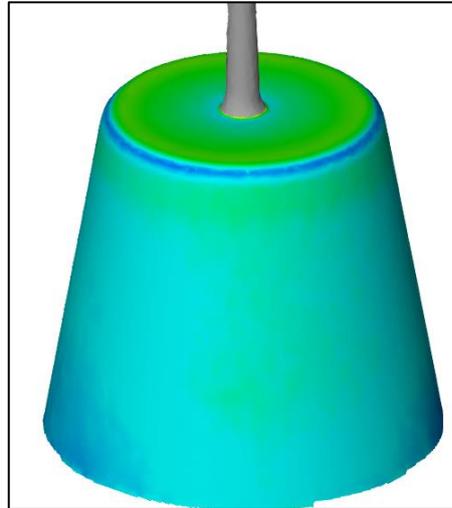
Fonte: O autor (2022)

Com o projeto atualizado, foi possível dar sequência com as análises das medidas das peças injetadas.

3.6.2 Verificação dimensional do produto

Após todos os produtos injetados, foi dado o tempo de resfriamento de no mínimo 48 horas, indicado por Harada (2004) para que sejam feitas as avaliações metrológicas sem que a contração ainda pudesse ser alterada. Este trabalho também foi realizado no laboratório de metrologia da empresa Aeromatrizes Indústria de Matrizes utilizando o *scanner* de medição que gerou a malha para comparação com o projeto, como mostrado na Figura 30.

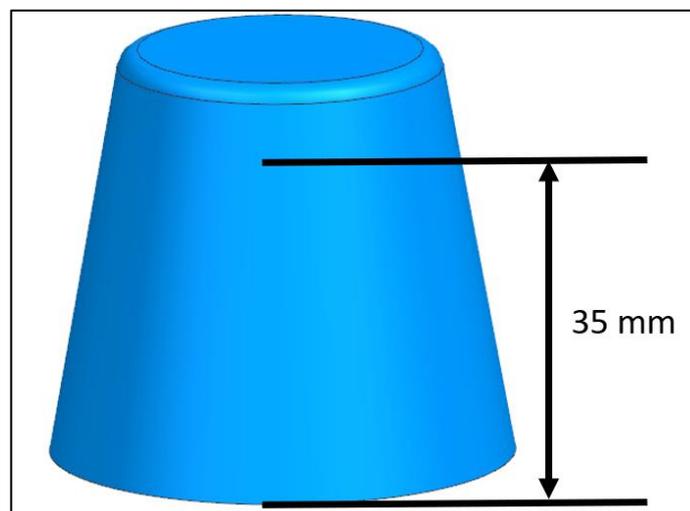
Figura 30 – Malha para comparação com o projeto



Fonte: O autor (2022)

Como o formato cônico do produto não permite que todos os lados da peça sejam estruturalmente iguais, a maneira mais precisa e que apresente a maior repetibilidade possível com a mesma pressão de injeção é sempre realizar as medições de desvio dimensional na região próxima ao ponto indicado pela Figura 31.

Figura 31 - Ponto de medição



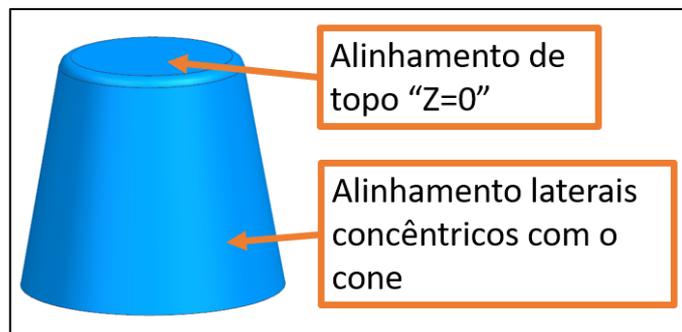
Fonte: O autor (2022)

A escolha deste ponto de medição ocorreu pelo fato de ser uma região onde as deformações vistas no produto injetado são menos influenciadas pela falta de estrutura da peça, tendo em vista que na parte de baixo do cone a geometria é aberta. Durante esta etapa, não foi produzido nenhum tipo de dispositivo, como um gabarito por exemplo, por razões de custo e também pelo produto dar condições de medição no local determinado.

Já a área mais acima dos 35 mm não foi escolhida, pelo fato de que haveriam chances de que as medidas serem retiradas da parte onde tem o raio que faz a transição da superfície cônica com a superfície horizontal plana.

Também, tanto para a simulação quanto para os resultados das análises metrológicas, a estratégia de alinhamento para conferência das medidas foi a mesma. O alinhamento de plano ocorreu na face superior do produto, e os alinhamentos laterais, foram concêntricos com o cone.

Figura 32 - Posicionamento para comparação



Fonte: O autor (2022)

Fazendo a análise dimensional desta forma, as chances de aferir um desvio onde as deformações são diferentes diminuem, levando a mais assertividade e confiabilidade para os resultados.

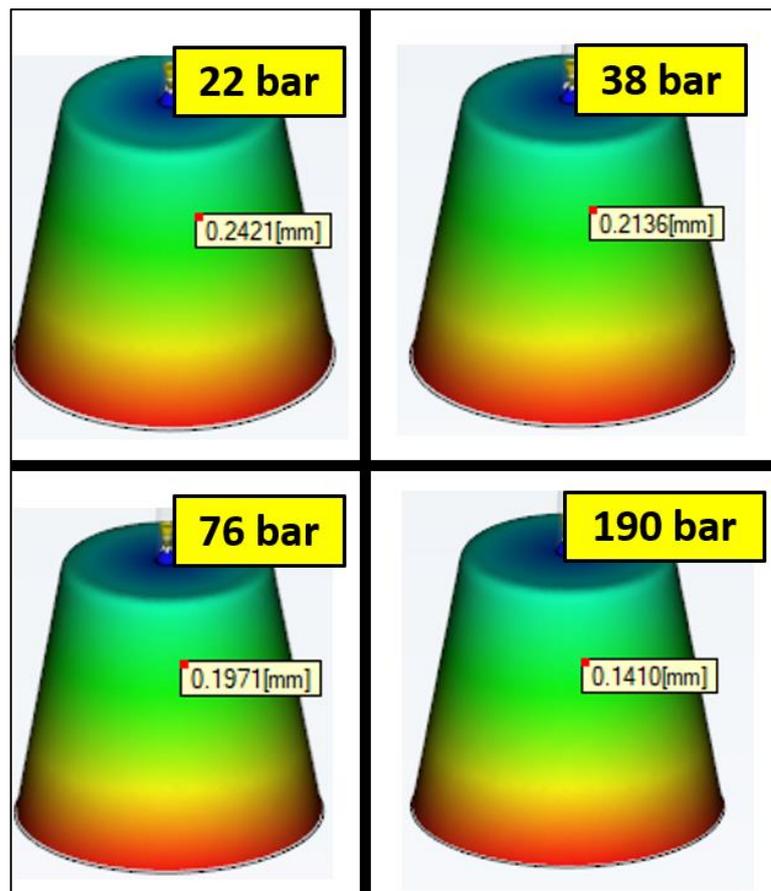
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação computacional e também os resultados dos ensaios para os valores da contração analisados em cada nível de pressão de injeção utilizados.

4.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados para a simulação, utilizando os parâmetros já citados no item 3.4 indicaram que, conforme os níveis de pressão de injeção são aumentados, a contração da peça injetada diminui. A Figura 33 apresenta os desvios de geometria indicados pelo MoldFlow® no ponto de medição padronizado.

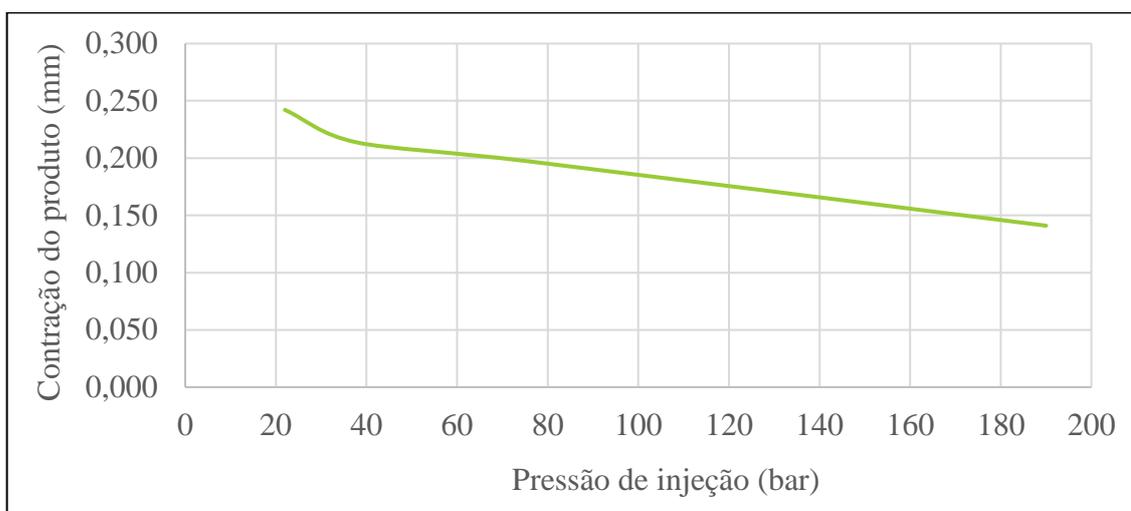
Figura 33 - Medida de contração na simulação de injeção



Fonte: O autor (2022)

Na Figura 34 é apresentado o gráfico que indica de maneira mais perceptível como o polímero se comportou com as mudanças de pressão realizadas nos ensaios.

Figura 34 - Contração dimensional segundo a simulação



Fonte: O autor (2022)

Nota-se que na Figura 34 não é possível identificar uma tendência de estabilidade para a contração. Na simulação tentou-se representar valores que seriam utilizados na realidade, como valores mais baixos de pressão.

Com o intuito de identificar em que região a curva que apresenta o comportamento do polímero de acordo com a variação de pressão começa a estabilizar, ou seja, não apresentar crescimento nem decrescimento de variação, foram adicionados mais alguns valores. Na Tabela 6 são apresentados os valores de todas as simulações.

Tabela 6 - Simulação de injeção

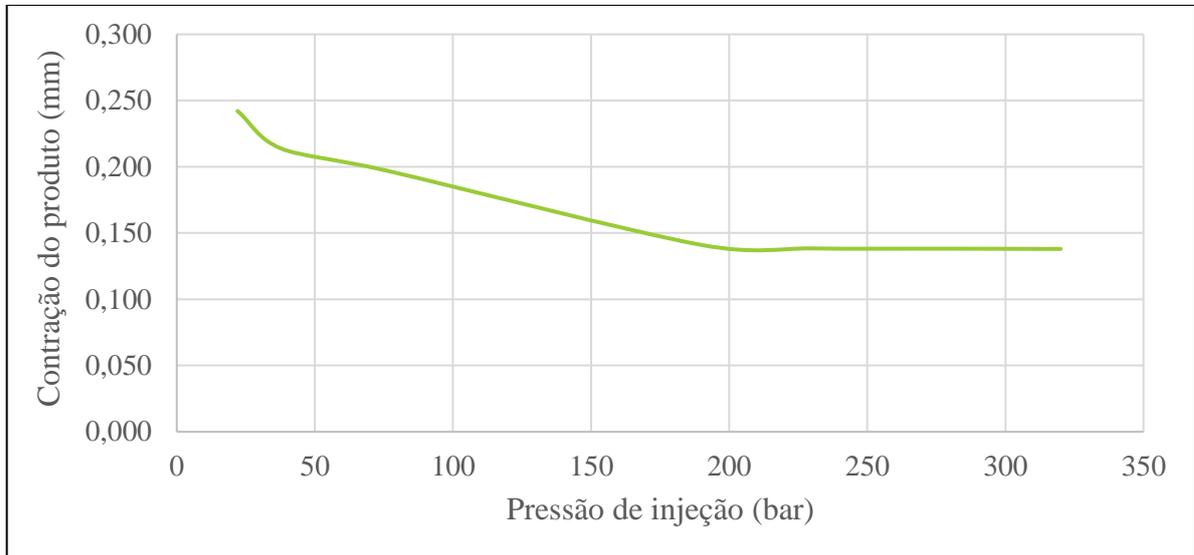
Pressão de injeção (bar)	Contração (mm)	Percentual de contração (%)
22	0,242	1,289
38	0,213	1,135
76	0,197	1,047
190	0,141	0,747
230	0,138	0,733
280	0,138	0,732
320	0,138	0,731

Fonte: O autor (2022)

A observação para estes novos valores é que os mesmos geralmente não são utilizados em situações de ensaios ou de produção de peças em série. Por se tratar de valores elevados de pressão interna no molde, podem ocorrer problemas, como degradar o polímero, aumento de rebarbas nas peças injetadas e até mesmo situações de trincas no molde caso o mesmo não tenha estrutura dimensionada para tal pressão.

A Figura 35 apresenta os valores utilizados na simulação de elementos finitos para identificar a região onde não há significativa variação da contração volumétrica.

Figura 35 - Ponto de estabilidade da contração

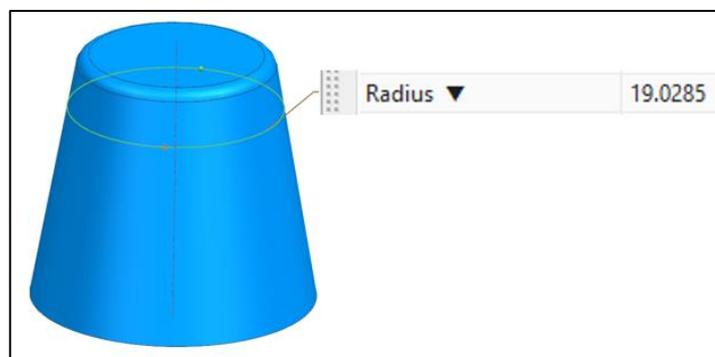


Fonte O autor (2022)

Neste gráfico é possível identificar que depois da região dos 200 bar de pressão de injeção, a contração da geometria permanece muito próxima ao das medidas das pressões anterior e posterior.

Com os valores da simulação e também com a medida do projeto do molde na região indicada anteriormente e apresentada na Figura 36, foi possível calcular o percentual de contração para cada pressão de injeção utilizado na simulação.

Figura 36 - Medida do projeto



Fonte: O autor (2022)

Os valores teóricos para a contração em cada pressão de injeção são apresentados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Percentual de contração da simulação

Pressão de injeção (bar)	Medida de projeto (mm)	Contração da simulação (mm)	Contração do polímero (%)
22,00	19,0285	0,242	1,289
38,00	19,0285	0,213	1,135
76,00	19,0285	0,197	1,047
190,00	19,0285	0,141	0,747
230,00	19,0285	0,138	0,733
280,00	19,0285	0,138	0,732
320,00	19,0285	0,138	0,731

Fonte: O autor (2022)

Com os valores apresentados na Tabela 7 é possível identificar que quanto maior é a pressão de injeção, menor é a contração do produto injetado segundo a simulação, porém ao chegar a um certo valor de pressão (230 bar), a contração começa a não ter variação significativa.

Com isso, os resultados das simulações coincidem com o que é descrito por Harada (2004) ou por Oliveira (2017) por exemplo, afirmando os métodos e parâmetros definidos para o processamento desta matéria prima.

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIO

A seguir são apresentados os valores de contração extraídos dos ensaios no laboratório de polímeros da UCS. Ambos os ensaios utilizam a maioria dos parâmetros de acordo com o que foi utilizado na simulação, como temperatura, tempo de ciclo e pressão de injeção. Porém no primeiro ensaio a pressão de recalque foi utilizada, caracterizando um ciclo completo que normalmente é utilizado, já no segundo teste, a pressão de recalque foi anulada.

4.2.1 Primeiro ensaio - 955 bar de pressão de recalque

O primeiro ensaio foi realizado em 25 de março de 2022, quando foram extraídas 40 peças, sendo 10 para cada valor de pressão de injeção. Destas peças, foram selecionadas aleatoriamente 5 unidades para cada valor de pressão e feitas as análises metrológicas para mensurar a contração do produto injetado em relação ao modelo com as medidas do molde.

A Figura 37 apresenta um exemplo de resultado de medida para cada pressão de injeção, e também indica o local onde foram feitas as medidas do desvio.

Figura 37 - Contração volumétrica do primeiro ensaio



Fonte: O autor (2022)

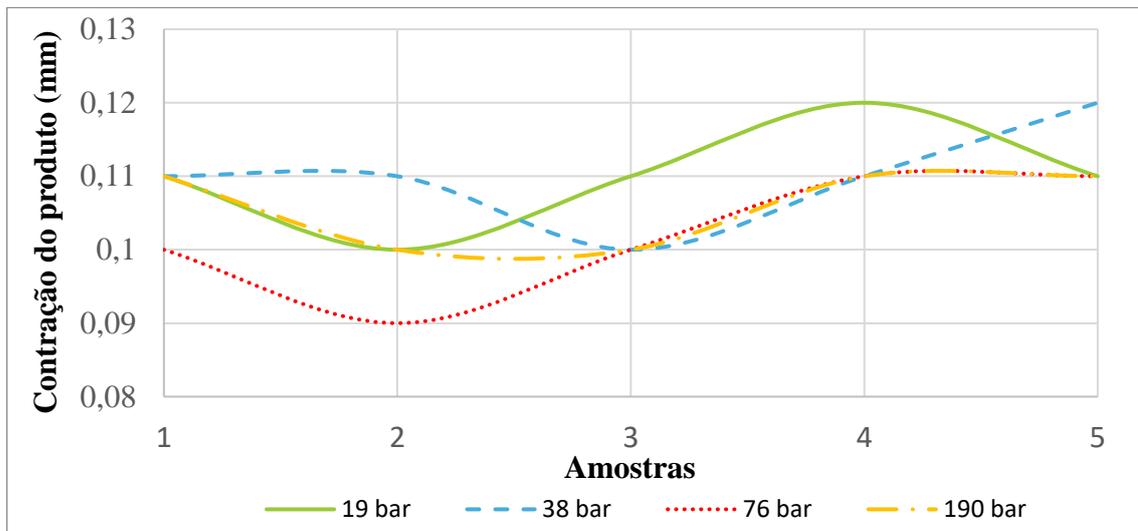
A Tabela 8 apresenta as medidas das cinco amostras que foram avaliadas para cada valor de pressão de injeção, já os gráficos da Figura 38 indicam a estabilidade dimensional que todas as peças possuíram.

Tabela 8 - Valores de contração no primeiro ensaio

Pressão de injeção (bar)	Contração (mm)						Desvio padrão (mm)
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Média	
19,00	0,11	0,10	0,11	0,12	0,11	0,11	0,007
38,00	0,11	0,11	0,10	0,11	0,12	0,11	0,007
76,00	0,10	0,09	0,10	0,11	0,11	0,10	0,008
190,00	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,005

Fonte: O autor (2022)

Figura 38 – Produtos injetados no primeiro ensaio



Fonte: O autor (2022)

Diferente do que foi visto simulação de injeção, o valor de desvio geométrico causado pela contração foi praticamente igual para todos os valores de pressão de injeção. Pequenas variações menores que 0,02 mm são desprezíveis, visto que podem ocorrer pequenos erros de medição pelo equipamento ou alinhamento em *software*, e também variáveis no processo de injeção.

Com isso, os valores de contração para o primeiro ensaio são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Percentual de contração do primeiro ensaio

Pressão de injeção (bar)	Medida de projeto (mm)	Contração da simulação (mm)	Contração do polímero (%)
19,00	19,0285	0,11	0,581
38,00	19,0285	0,11	0,581
76,00	19,0285	0,10	0,528
190,00	19,0285	0,11	0,581

Fonte: O autor (2022)

Pelo fato do primeiro ensaio não refletir a simulação, foi decidido então fazer um segundo ensaio, alterando a pressão de recalque da injetora, pois esta, mesmo sendo aplicada a mínima que a máquina injetora pode ser configurada, ainda é muito elevada para a geometria da peça analisada. Porém como comentado anteriormente, não foi possível diminuir esta pressão até os valores desejados, que seriam 19 bar ou até mesmo desativando essa variável no processo.

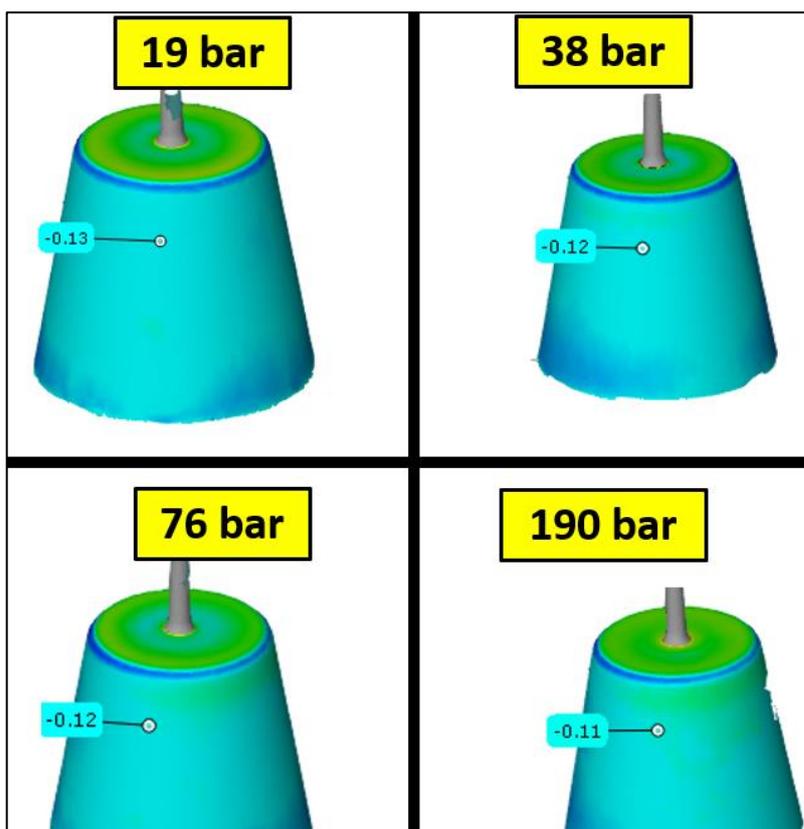
4.2.2 Segundo ensaio – 668,5 bar de pressão de recalque

Foi realizado um segundo ensaio no dia 25 de maio de 2022, onde foi alterado a pressão de recalque, utilizando 35% da pressão máxima da máquina injetora, que equivale a 668,5 bar. Desta vez, foram injetados após o processo estabilizar somente a quantidade de peças que seriam necessárias para realizar as análises metroológicas, sendo cinco amostras para cada valor de pressão de injeção.

A Figura 39 apresenta um exemplo de resultado de medida para cada pressão de injeção, e também indica o local onde foram feitas as medidas do desvio.

Considerando a margem de erro do equipamento de medição e do alinhamento em *software* da malha digitalizada com o projeto do produto, não houveram alterações nas medidas da peça se comparado ao primeiro ensaio.

Figura 39 - Contração volumétrica do segundo ensaio



Fonte: O autor (2022)

Isso indica que quando a pressão de recalque possui valores muito elevados, como é o que aconteceu neste estudo, a pressão de injeção não possui significância perceptível para a medida final do produto.

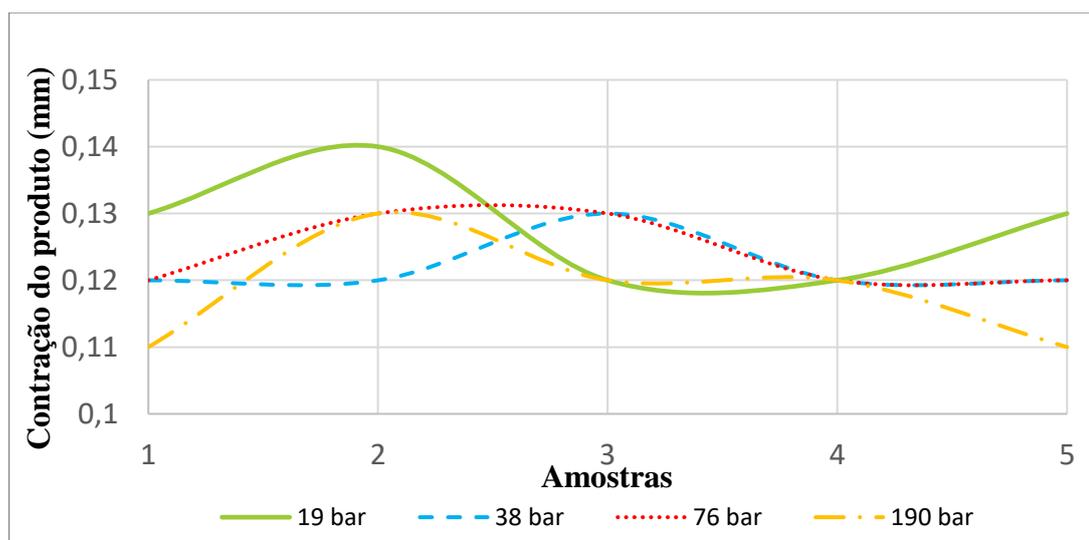
A Tabela 10 apresenta as medidas das cinco amostras que foram avaliadas para cada valor de pressão de injeção, já o gráfico da Figura 40 a estabilidade dimensional que todas as peças possuíram mesmo com a pressão de recalque menor que no primeiro ensaio.

Tabela 10 - Valores de contração no segundo ensaio

Pressão de injeção (bar)	Contração (mm)						Desvio padrão (mm)
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Média	
19,00	0,13	0,14	0,12	0,12	0,13	0,13	0,008
38,00	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,004
76,00	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,005
190,00	0,11	0,13	0,12	0,12	0,11	0,12	0,008

Fonte: O autor (2022)

Figura 40 - Produtos injetados no segundo ensaio



Fonte: O autor (2022)

A Tabela 10 apresenta os valores de contração encontrados no segundo ensaio.

Tabela 10 - Percentual de contração do segundo ensaio

Pressão de injeção (bar)	Medida de projeto (mm)	Contração da simulação (mm)	Contração do polímero (%)
19,00	19,0285	0,13	0,688
38,00	19,0285	0,12	0,635
76,00	19,0285	0,12	0,635
190,00	19,0285	0,12	0,635

Fonte: O autor (2022)

Os resultados dos ensaios não seguiram a tendência que ocorreu na simulação computacional e também não indicaram valores semelhantes, ou seja, também não está de acordo com o que é mostrado nas literaturas utilizadas como base para este estudo de contração de polímeros.

As razões pelas quais isso aconteceu podem ser os parâmetros do processo de injeção, como pressões, temperaturas ou tempos, mas também motivos como a geometria de determinados tipos de peças podem não resultar no que é esperado por motivos da própria estrutura do componente.

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Nos primeiros resultados obtidos no estudo, que são referentes à simulação, é observado que conforme a pressão de injeção é alterada, a contração final do produto injetado também é modificada como consequência. Já nos ensaios a variação da contração dos produtos com a variação da pressão de injeção não foi expressiva, devido à pressão de recalque ser elevada.

A Tabela 11 apresenta a base para comparação entre a simulação e os ensaios, foram escolhidas duas pressões de injeção sendo estas a menor (19 bar e 22 bar) e a maior (190 bar) pressão utilizada no estudo, e seus devidos resultados. Também nesta comparação foi adicionado os valores teóricos indicados por Harada (2004).

Tabela 11 - Comparação dos resultados

Pressão de injeção	Contração			Harada (2004)
	Simulação	Ensaio 1	Ensaio 2	
19 bar / 22 bar	1,289 %	0,581 %	0,688 %	1,5 % - 2,5 %
190 bar	0,747 %	0,581 %	0,635 %	

Fonte: O autor (2022)

Geralmente os valores de contração existentes na literatura para um determinado material, são encontrados por métodos experimentais, ou seja, ensaios foram realizados para indicar o percentual de contração de um determinado polímero.

Embora haja diferença de aproximadamente 0,2 % entre a contração encontrada na simulação e o indicado por Harada (2004) na menor pressão de injeção, pode-se dizer que os resultados coincidem. Essa variação pode ser explicada por diversos fatores como:

- A matéria prima que pode não ser a mesma, embora ambas genericamente falando são polipropileno. Muitos fabricantes desenvolvem seus próprios produtos, alguns

modificam adicionando talco à mistura, o que garante maior estabilidade dimensional e aumenta a fluidez do polímero, também pode ser adicionado fibra de vidro que aumenta a resistência ao impacto, entre outros materiais que podem ser agregados a mistura.

- b) Também não é explícito por Harada (2004) quais foram os métodos utilizados para o ensaio que resultou nos valores de contração de 1.5% à 2,5%. Fatores como tempo de injeção e resfriamento, pressões de injeção e recalque, temperatura do molde, temperatura do polímero e velocidade de injeção, quando alterados individualmente ou combinados resultam em produtos diferentes, algumas configurações terão maior mudança, outras apresentarão menos.
- c) O tamanho e o formato também podem influenciar nas medidas, como casos em que a espessura da peça não é uniforme ou possui nervuras necessárias para conceder melhor estrutura ao componente. A peça deste estudo possui espessura nominal de dois milímetros, que é uma medida aproximada, por exemplo, às utilizadas em produtos da linha automotiva, com a diferença que geralmente estes produtos são maiores e menos estruturados, necessitando de sistemas de fixação para medição correta das peças.

Já a contração encontrada nas peças medidas após os ensaios é menor que a citada pelo autor, e também é menor que a encontrada na simulação de injeção. Nota-se que do primeiro ensaio para o segundo existe variação, mas não é considerável pois esse percentual representa valores pequenos nas medidas da peça.

A diferença entre a contração das peças do ensaio e a citada por Harada (2004) para este polímero não pode ser considerada como margem de erro, pois trata-se de aproximadamente 50% menor. Isso pode ser explicado pelos mesmos motivos citados anteriormente, mas principalmente por não ser possível diminuir a pressão de recalque da máquina injetora durante o processo.

É comum que as empresas que fornecem matéria prima polimérica indiquem a margem de contração que seu produto atingirá se for seguido os parâmetros de processo de acordo com o manual do material, com por exemplo as empresas Thermoblend e Moldpart, citadas anteriormente neste estudo.

Como alternativa para identificar qual seria a contração correta para este material caso os valores da literatura não fossem considerados, é medir a massa das peças e verificar qual mais se aproxima dos valores teóricos. Para isso, foi utilizado uma balança convencional, como mostra a Figura 41.

A massa das peças é um importante dado para verificação do volume total de polímero durante a injeção. Se os valores da teoria e da prática ficarem próximos, mais alguns possíveis erros de parâmetros do processo podem ser descartados.

Figura 41 – Balança utilizada



Fonte: O autor (2022)

A Tabela 12 apresenta a massa das peças de cada um dos ensaios e também para cada pressão de injeção utilizada.

Tabela 12 - Massa das peças injetadas

	Pressão de injeção				Massa das peças
	19 bar	38 bar	76 bar	190 bar	
955 bar de recalque	13 gramas	12 gramas	12 gramas	12 gramas	
668,5 bar de recalque	12 gramas	12 gramas	12 gramas	12 gramas	

Fonte: O autor (2022)

Segundo a fabricante Borealis, a densidade para seu polímero Daplen EH119HP é de $0,97 \text{ g/cm}^3$. O modelo da peça do estudo possui um volume de $13,57 \text{ cm}^3$, com isso a massa teórica para a mesma é de $13,15 \text{ g}$.

Em termos de massa do produto, as diferenças entre a teoria e a prática são pequenas, menores que 10%. Este é um indicativo de que o volume de material injetado nos ensaios está de acordo com o necessário. Também confirmou a similaridade dos resultados apresentados nas medidas dimensionais das peças ensaiadas, onde ocorreu pouca variação entre as mesmas.

5. CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo definir quantitativamente as diferenças de contração causadas pela variação da pressão de injeção de peças que passam pelo processo de injeção de polímeros. O principal fator que levou ao desenvolvimento deste estudo foram as variações dimensionais de medidas de peças injetadas de uma empresa que fabrica molde de injeção, que levantou a suspeita inicial de que o valor da contração que foi utilizado para o projeto e fabricação do molde de injeção estava incorreto, o que acabaria por inutilizar o molde. Porém, o que estava acontecendo era um erro humano, onde o operador da máquina injetora havia configurado a pressão de injeção da forma incorreta.

Tomou-se como base para início das simulações de injeção através do *software* de elementos finitos MoldFlow® e os ensaios, os parâmetros de utilização do material polimérico Daplen EH119HP indicados pela fabricante Borealis.

A simulação de injeção apresentou resultados de contração em decorrência de cada valor de pressão de injeção. Nas pressões de injeção mais baixas ocorriam deformações maiores, enquanto para maiores pressões de injeção menos expressivas eram estas deformações. Ao alcançar valores próximos a 200 MPa de pressão de injeção o processo começou a não ter mais variações significativas, sendo identificado este ponto como uma estabilidade no valor de contração para este polímero.

Avaliando os resultados dos ensaios, não se pode identificar a mesma tendência de contração. O equipamento utilizado para injetar as peças não funcionava com baixos valores de pressão de recalque, e os valores que era possível realizar um ciclo completo de injeção eram muito maiores que a própria pressão de injeção, o que, considerando as margens de erro do equipamento de medição entre outros fatores, acabou anulando as diferenças de medida entre as peças injetadas com diferentes pressões de injeção.

Outro possível ponto que pode ter causado esse problema pode ser devido ao formato da peça do estudo, que foi escolhida pelo fato de poder reutilizar o um molde que já havia sido empregado em outros estudos, mas que para este fim talvez não fosse a melhor escolha para os trabalhos práticos.

Levando em conta os valores extraídos da simulação, onde não ocorrem problemas de equipamentos físicos e também por ser totalmente teórico minimiza possíveis adversidades vindas da geometria da peça injetada, pode-se afirmar que as diferenças de contração causadas pela variação da pressão de injeção ocorrem perceptivelmente, principalmente se forem aplicadas em produtos maiores ou com espessuras maiores.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se realizar o ensaio novamente, mas com um equipamento de injeção que aceite parâmetros de perfil de pressão de recalque como os que foram discutidos no trabalho, sendo esses abaixo dos 19 bar ou até mesmo desligando essa função de recalque. Também se possível utilizar o mesmo material polimérico para não ser necessário refazer as simulações de injeção com a nova matéria prima.

Outra sugestão seria a avaliação das medidas antes e depois da contração em peças de maior porte, que geralmente terão valores mais expressivos, sendo assim, maior será a facilidade de identificar a diferença do tamanho da peça conforme a pressão de injeção é alterada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS. Como evitar contração pós moldagem. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/como-evitar-a-contracao-pos-moldagem/>>. Data de acesso em: 10/10/2021.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D955-0: Standard test method of mesuring shrinkage form mold dimendions os thermoplastics**. West Conshohocken. p.04.2013.

CATAPAN, M. F. Sistematização de projeto preliminar de componentes de plástico injetados: uma definição da forma usando DFMA. UNIVERSIDADE DE SANTA CATARINA. JOINVILLE. 2006.

CRACKNELL, P. S.; DYSON, R. W. **Handbook of thermoplastics injection mould design**. 1. ed.: Blackie academic & professional, 1993.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 16742: Toleranzen und Abnahmebedingungen**. Berlin. p.19. 2013.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projeto e princípios básicos**. São Paulo: ArtLiber, 2004.

JUNKLES, R. F. **Análise de sistemas de refrigeração em moldes para injeção de Termoplásticos**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Joinville, 2017.

MOLDES DE INJEÇÃO PLÁSTICOS. Detalhes para o desenvolvimento de produtos plásticos. Disponível em: <<http://moldesinjecaoplasticos.com.br/desenvolvimento-de-produtos/>>. Data de acesso em: 01/11/2021

MOLDPART. Tabela de contração dos materiais. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/386012535/Tabela-de-Contracao-do-PVC>. Data de acesso em 15/11/2021

MONTGOMERY, DOUGLAS C. **Design and Analysis of experiments**. 8ª ed. Universidade do estado do Arizona. Arizona. 2013.

OLIVEIRA, A. L. **Proposta de um método para especificação de tolerâncias dimensionais de produção de peças plásticas injetadas**. Universidade de Santa Catarina. Florianópolis. 2017.

OLIVEIRA, A. L; DONATELLI, G. D. **Especificação de tolerâncias de peças plásticas utilizando dados de medição de peças similares**. Universidade de Santa Catarina. Joinville. 2015.

PHILPOT, Timothy A. **Mecânica dos Materiais: um sistema integrado de ensino**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2013.

RUSHING, HEATH; KARL, ANDREW e WISNOWSKI, JAMES. **Desing and Analysis of Experimentrts by Douglas Montgomery: A supplement for Using JMP®**. 1ª ED. NORTH CAROLINA, USA: SAS,2013.

SACCHELI, C. M; **Sistematização do processo de desenvolvimento integrado de moldes de injeção de termoplásticos**. 2007. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2007.

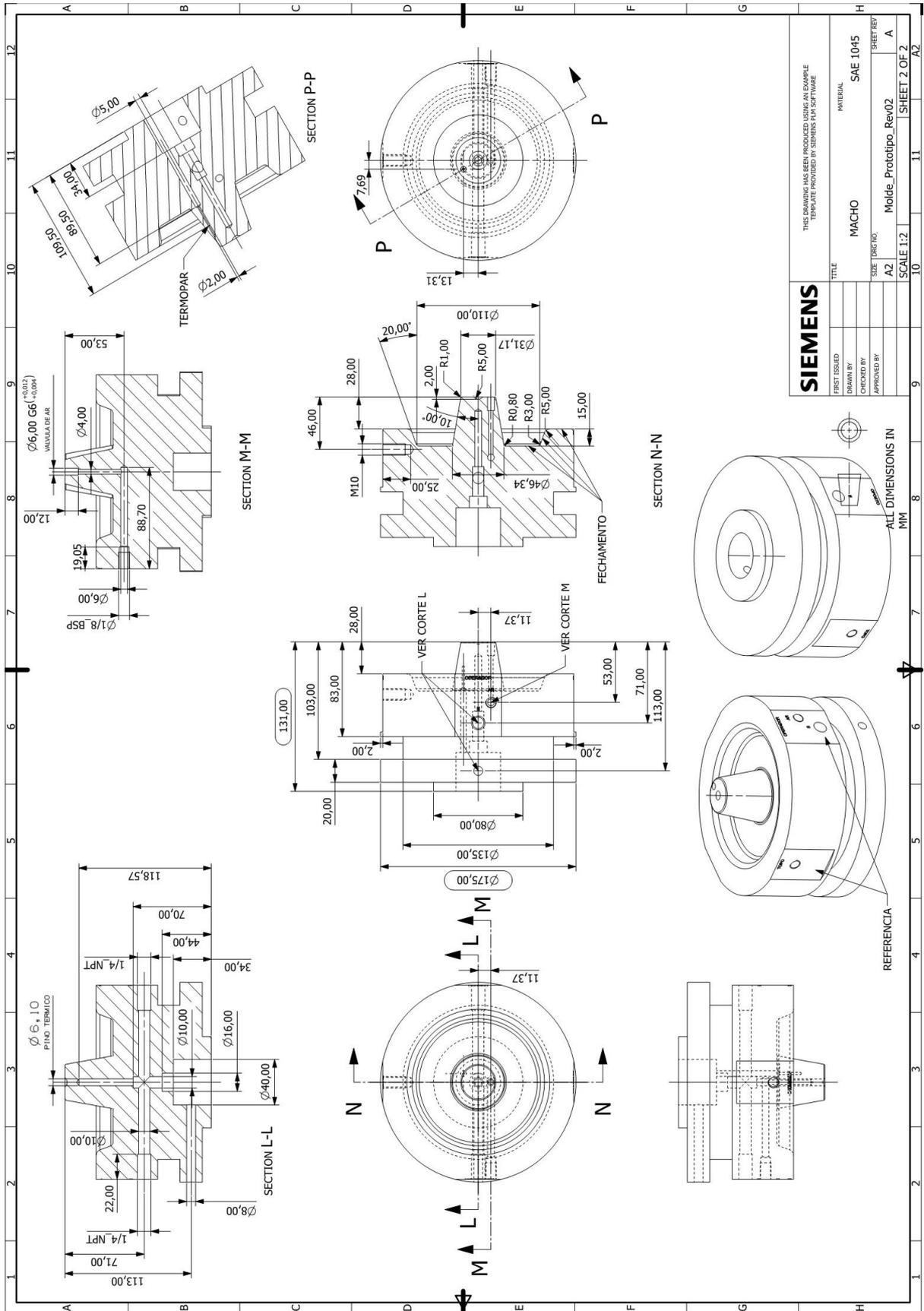
SOUZA, W. B; ALEIDA, G, S, G. **Molde e matrizes**. Características, desenvolvimento e funcionalidades para transformação de plásticos. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2015.

SOUZA, W. B; ALEIDA, G, S, G. **Processamento de polímeros por extrusão e injeção**. Conceitos equipamentos e aplicações. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2015.

THERMOBLEND. Contração dos polímeros (encolhimento). Disponível em: <<https://www.thermoblend.com.br/wp-content/uploads/2020/04/Contra%C3%A7%C3%A3o-em-Pol%C3%ADmeros-V1.0.pdf>>. Data de acesso em: 18/08/2021.

TRENTIN, E. L. **Estudo da transferência de calor em um molde protótipo usando pino térmico**. 2020. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2020.

Figura 43 - Detalhamento Lado Móvel



Fonte: Trentin (2020)

APÊNDICE B - ENSAIO

Figura 44 - Temperatura do molde durante o ciclo de injeção



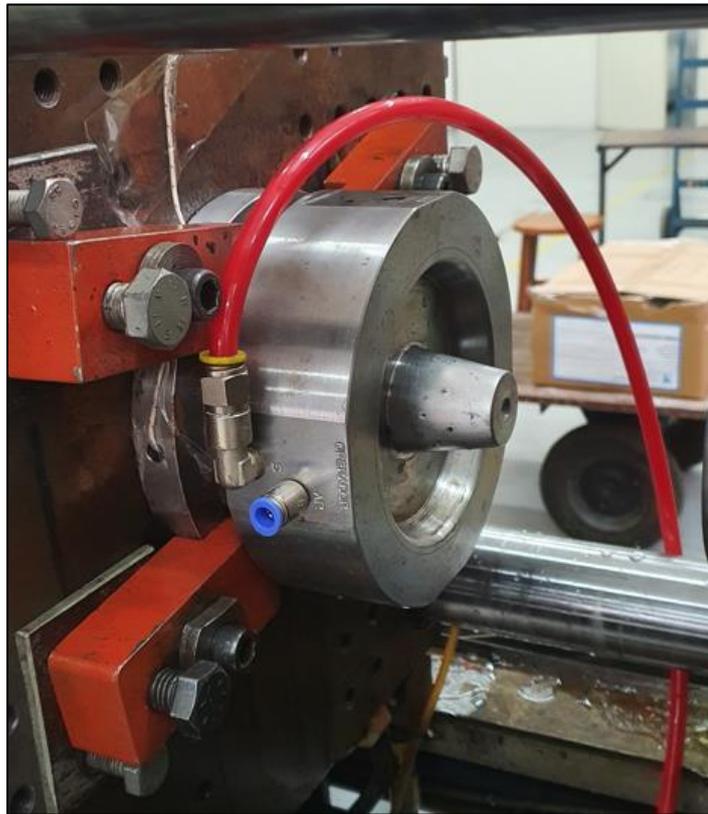
Fonte: O autor (2022)

Figura 45 - Molde na máquina injetora



Fonte: O autor (2022)

Figura 46 - Lado móvel na máquina injetora



Fonte: O autor (2022)

Figura 47 - Lado fixo na máquina injetora



Fonte: O autor (2022)

ANEXOS

ANEXO A - DESVIOS ACEITOS SEGUINDO A NORMA DIN 16742:2013

Tolerance group		Limit dimensions (GA) for nominal size ranges																	Dimensions in millimetres			
		1 to 3	> 3 to 6	> 6 to 10	> 10 to 18	> 18 to 30	> 30 to 50	> 50 to 80	> 80 to 120	> 120 to 180	> 180 to 250	> 250 to 315	> 315 to 400	> 400 to 500	> 500 to 630	> 630 to 800	> 800 to 1000					
TG1	W	± 0,007	± 0,012	± 0,018	± 0,022	± 0,026	± 0,031	± 0,037	± 0,044	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	NW	± 0,012	± 0,018	± 0,022	± 0,026	± 0,031	± 0,037	± 0,044	± 0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
TG2	W	± 0,013	± 0,020	± 0,029	± 0,035	± 0,042	± 0,050	± 0,060	± 0,090	± 0,13	± 0,15	± 0,16	± 0,18	± 0,20	-	-	-	-	-	-		
	NW	± 0,020	± 0,029	± 0,035	± 0,042	± 0,050	± 0,060	± 0,090	± 0,13	± 0,15	± 0,16	± 0,18	± 0,20	± 0,22	-	-	-	-	-	-		
TG3	W	± 0,020	± 0,031	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,15	± 0,20	± 0,23	± 0,26	± 0,29	± 0,40	± 0,55	± 0,63	± 0,70	± 0,77				
	NW	± 0,031	± 0,050	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,15	± 0,20	± 0,23	± 0,26	± 0,29	± 0,40	± 0,55	± 0,63	± 0,70	± 0,77					
TG4	W	± 0,03	± 0,05	± 0,08	± 0,09	± 0,11	± 0,13	± 0,15	± 0,23	± 0,32	± 0,35	± 0,41	± 0,45	± 0,63	± 0,88	± 1,00	± 1,15					
	NW	± 0,05	± 0,08	± 0,09	± 0,11	± 0,13	± 0,15	± 0,23	± 0,32	± 0,35	± 0,41	± 0,45	± 0,63	± 0,88	± 1,00	± 1,15	± 1,30					
TG5	W	± 0,05	± 0,08	± 0,11	± 0,14	± 0,17	± 0,20	± 0,23	± 0,36	± 0,50	± 0,58	± 0,65	± 0,70	± 1,00	± 1,40	± 1,60	± 1,80					
	NW	± 0,08	± 0,11	± 0,14	± 0,17	± 0,20	± 0,23	± 0,36	± 0,50	± 0,58	± 0,65	± 0,70	± 1,00	± 1,40	± 1,60	± 1,80	± 2,10					
TG6	W	± 0,07	± 0,12	± 0,18	± 0,22	± 0,26	± 0,31	± 0,37	± 0,57	± 0,80	± 0,93	± 1,05	± 1,15	± 1,60	± 2,20	± 2,50	± 2,80					
	NW	± 0,12	± 0,18	± 0,22	± 0,26	± 0,31	± 0,37	± 0,57	± 0,80	± 0,93	± 1,05	± 1,15	± 1,60	± 2,20	± 2,50	± 2,80	± 3,10					
TG7	W	± 0,13	± 0,20	± 0,29	± 0,35	± 0,42	± 0,50	± 0,60	± 0,90	± 1,25	± 1,45	± 1,60	± 1,80	± 2,60	± 3,50	± 4,00	± 4,50					
	NW	± 0,20	± 0,29	± 0,35	± 0,42	± 0,50	± 0,60	± 0,90	± 1,25	± 1,45	± 1,60	± 1,80	± 2,60	± 3,50	± 4,00	± 4,50	± 5,00					
TG8	W	± 0,20	± 0,31	± 0,45	± 0,55	± 0,65	± 0,80	± 0,95	± 1,40	± 2,00	± 2,30	± 2,60	± 2,85	± 4,00	± 5,50	± 6,25	± 7,00					
	NW	± 0,31	± 0,45	± 0,55	± 0,65	± 0,80	± 0,95	± 1,40	± 2,00	± 2,30	± 2,60	± 2,85	± 4,00	± 5,50	± 6,25	± 7,00	± 7,75					
TG9		± 0,30	± 0,49	± 0,75	± 0,90	± 1,05	± 1,25	± 1,50	± 2,25	± 3,15	± 3,60	± 4,05	± 4,45	± 6,20	± 8,50	± 10,00	± 11,50					

NOTE 1 W: Tool-specific dimensions; NW: Non-tool-specific dimensions.
 NOTE 2 The differentiation of tool-specific and non-tool-specific dimension is not necessary for TG9.
 NOTE 3 Tolerance mean dimensions apply as nominal sizes for moulded part drawings ($\phi_N = C_T$). For tolerancing of the distance between parallel surfaces that do not face each other directly but are arranged shifted to one another, the D_p dimension according to 7.2 of this standard is to be used as nominal size.
 NOTE 4 Dimensions under 1 mm and above 1 000 mm are subject to mandatory agreement.
 NOTE 5 Only the limit values for non-tool-specific dimensions are to be used for general tolerances.
 NOTE 6 Tolerances for material thicknesses are subject to mandatory agreement.
 NOTE 7 General tolerances are to be indicated in the design documentation as follows. Example: DIN 16742 – TG6.
 NOTE 8 For validation of machine and process capability, see Annex E.

Fonte: DIN 16742 (2013)