

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA**

**BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**KISA TERESA TAHO**

**INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE INJEÇÃO E DE MOLDE NAS  
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA  
DE ABS COM A FORMAÇÃO DE LINHAS DE SOLDA**

**FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2017.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA**

**BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**KISA TERESA TAHO**

**INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE INJEÇÃO E DE MOLDE NAS  
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA  
DE ABS COM A FORMAÇÃO DE LINHAS DE SOLDA**

Trabalho de Conclusão de Curso Submetido  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Professor orientador: Aurélio da Costa  
Sabino Netto, Dr. Eng.

**FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2017.**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Taho, Kisa Teresa  
**INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE INJEÇÃO E DE MOLDE  
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA DE ABS  
COM A FORMAÇÃO DE LINHAS DE SOLDA** / Kisa Teresa  
Taho ; orientação de Aurélio da Costa Sabino Netto.  
- Florianópolis, SC, 2017.  
68 p.  
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Mecatrônica. Departamento  
Acadêmico de Metal Mecânica.  
Inclui Referências.

1. Linha de solda. 2. Injeção. 3. ABS. 4. Temperatura.  
5. Contração. I. Sabino Netto, Aurélio da Costa.  
II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento  
Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.

# **INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE INJEÇÃO E DE MOLDE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA DE ABS COM A FORMAÇÃO DE LINHAS DE SOLDA**

**KISA TERESA TAHO**

Esse trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de dezembro, 2017.

Banca Examinadora:

---

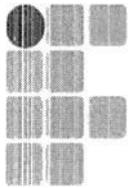
Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng. (Orientador)

---

Diovani Castoldi Lencina, Dr. Eng.

---

André Roberto de Sousa, Dr. Eng.



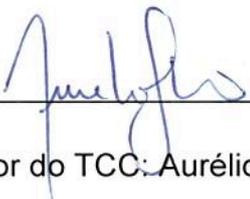
INSTITUTO FEDERAL  
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

## DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **Kisa Teresa Taho**, matrícula nº 131000239-8, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE INJEÇÃO E DE MOLDE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA DE ABS COM A FORMAÇÃO DE LINHAS DE SOLDA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis.

Florianópolis, 15 de Dezembro de 2017.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Orientador do TCC: Aurélio da Costa Sabino Netto

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por acreditarem em mim e sempre fornecerem o que eu precisava em forma de recursos, palavras e amor.

Aos meus irmãos e cunhados pelo incentivo, ajuda e conselhos que me fizeram seguir na graduação.

À minha família em Florianópolis pela estadia e momentos sensacionais que passamos juntos.

Ao meu orientador Aurélio, pela dedicação e orientação a esse trabalho, também por ter me mostrado o incrível mundo de injeção de polímeros e junto ao professor Diovani terem me incentivado à pesquisa em projetos da área.

Aos professores Edson e André, por conceder o conhecimento e as ferramentas necessárias para a elaboração dessa pesquisa.

Aos amigos Gabrielli, Marcos, Max, Michel e Vinicius, que lutaram comigo durante esses 5 anos. Honestamente, não teria conseguido sem vocês.

Aos colegas de laboratório Pedro e Igor pelo auxílio durante a realização dessa etapa.

À turma de 2013-1, pelo começo dessa jornada e por me apresentar amigos que levarei pra sempre.

## RESUMO

O processo de injeção de polímeros, apesar de ter alta repetitividade, sofre influências de diversos fatores, que por sua vez acabam refletindo em alterações nas propriedades da peça. Quando conhecidas, essas modificações podem atuar de forma vantajosa para características da peça, garantindo melhoria em suas propriedades e até mesmo atuando sobre defeitos a fim de minimizá-los ou eliminá-los. Dessa forma, esse estudo objetivou observar como alterações nos parâmetros de temperatura de injeção, temperatura do molde e pressão de comutação afetam propriedades físicas (massa e dimensão), propriedades mecânicas e a formação de linhas de solda de corpos de prova de tração. As peças moldadas em ABS foram injetadas em um molde instrumentado com sensores de pressão e temperatura que permitiram monitorar as respectivas variáveis dentro da cavidade. Para a leitura do termopar foi implementado um sistema de aquisições externo com módulos da *National Instruments*. Também foram realizadas simulações no *SolidWorks Plastics* para integrar os resultados. A análise de variância constatou que a temperatura de injeção influencia significativamente a massa e a contração dos corpos, enquanto a temperatura do molde, apenas a relação com a massa é comprovada. Já para os resultados gerados pelo ensaio de tração, nenhuma variável de controle foi estatisticamente significativa para as características da linha de solda, apresentando resultados semelhantes para todas as condições analisadas. Porém, entende-se que esse fato deriva da pressão de recalque ter sido constante em uma proporção de 60% da pressão de injeção. Nos ensaios com a comutação controlada pela pressão na cavidade, verificou-se a tendência do aumento da massa com o aumento da pressão de comutação, porém, evidenciou-se um valor de estabilização para a massa. Ainda foi possível comparar as dimensões entre os corpos de prova com linha de solda e da entrada, constatando um valor superior de contração no corpo com linha de solda. Com as dimensões de espessura dos corpos foi possível comprovar que as condições de comutação por pressão tiveram menor contração que os ensaios da primeira etapa. A leitura da temperatura do molde explicitou um aquecimento do mesmo durante os ciclos de injeção até sua estabilização em uma temperatura superior a de referência.

**Palavras-chave:** Linha de solda. Injeção. ABS. Temperatura. Contração.

## ABSTRACT

Despite having high repeatability, the injection molding process is influenced by several factors, which end up reflecting in changes of the molding part's properties. When known, these modifications can benefit the part's characteristics, ensuring improvement of their properties and even affecting on imperfections in order to minimize or eliminate them. In this way, this study attempted to observe how the variation of the parameters of melt temperature, mold temperature and pressure switchover affect physical properties (such as mass and size), mechanical properties and the formation of weld lines in tensile test specimen. ABS molded parts were injected in an instrumented mold with pressure and temperature sensors that allowed the supervising of the respective variables inside the cavity. For the data acquisition of the thermocouple, an external system was developed and implemented with National Instruments modules. Also, there were performed simulations in SolidWorks Plastics to integrate the results. The analysis of variance found that melt temperature influences significantly the mass and the shrinkage of the specimens, while for the mold temperature only the relation with the mass was proved. For the results generated by the tensile test, no control variable was statistically significant for the characteristics of the weld line, presenting similar behaviors for all analyzed conditions. However, it is understood that this matter derives from the pack pressure having been constant in a proportion of 60% of the injection pressure. In the tests with pressure switchover, the tendency of the increase of the mass with the increase of the switching pressure was verified, however, a mass stabilization value was evidenced. It was still possible to compare the dimensions between the test specimens with weld line and from entrance, noting a higher value of shrinkage in the weld line specimen. With the thickness values of the parts it was possible to prove that the pressure of the switching conditions had lower shrinkage than the first test stage. The reading of the mold temperature explained a heating thereof during the injection cycles until its stabilization at a temperature above the reference temperature.

**Keywords:** Weld line. Injection. ABS. Temperature. Shrinkage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Morfologia e propriedades de um polímero (a) amorfo e de um (b) semicristalino.....	19
Figura 2 - Influência dos monômeros nas propriedades do ABS. ....	20
Figura 3 - Máquina injetora convencional.....	21
Figura 4 - Ciclo de injeção convencional.....	23
Figura 5 - Contração de materiais com e sem reforços.....	26
Figura 6 - Formação de linha de solda pelo encontro frontal de frentes de fluxo. ....	28
Figura 7 - Linha de solda: a) fria e b) quente.....	29
Figura 8 - Fluxo do fundido na formação de linha de solda.....	30
Figura 9 - Exemplo do comportamento dos materiais em uma curta tensão-deformação. ....	32
Figura 10 - Corpo de prova utilizado para pesquisa (dimensões em milímetros).....	34
Figura 11 - Modelo CAD da peça injetada com identificação de: a) canal de entrada e canal de alimentação; b) corpos de prova e fluxo do material.....	35
Figura 12 - Molde utilizado: a) conjunto completo; b) placa fixa e cavidade. ....	35
Figura 13 - Localização dos sensores na peça de estudo. ....	36
Figura 14 - Perfil de pressão de recalque recomendado para materiais amorfos. ....	39
Figura 15 - Ligação elétrica do sistema de aquisição de temperatura .....	41
Figura 16 - Fluxograma básico do funcionamento do sistema de aquisição de temperatura do ciclo.....	42
Figura 17 - Programação do LabView para sistema de aquisição de temperatura. ...	43
Figura 18 - Supervisório do sistema de aquisição de temperatura.....	44
Figura 19 – Componentes virtuais para auxiliar a simulação: a) canais de resfriamento e ponto de injeção; b) molde. ....	45
Figura 20 - Dimensões do corpo de prova a serem mensurados.....	46
Figura 21 - Mensuração das peças injetadas.....	46
Figura 22 - Aferição da massa das peças moldadas por injeção. ....	47
Figura 23 - Linha de solda aparente.....	49
Figura 24 - Rebarbas dos corpos de prova .....	50
Figura 25 – Gráfico de resposta da massa. ....	51
Figura 26 - Gráfico de colchão de material pela temperatura de injeção. ....	52

Figura 27 - Gráfico da massa em função da pressão de comutação. ....	53
Figura 28 - Gráfico de resposta contração. ....	54
Figura 29 - Gráfico da pressão na cavidade dos corpos de prova. ....	56
Figura 30 - Aumento da temperatura da frente de fluxo .....	56
Figura 31 - Sobrepressão (P50) e Pressão ideal (P5).....	58
Figura 32 - Curva tensão-deformação dos corpos de prova da condição 4. ....	58
Figura 33 - Gráfico de resposta da tensão de ruptura.....	59
Figura 34 - Gráfico de resposta da deformação .....	61
Figura 35 - Gráfico de resposta do módulo de elasticidade. ....	62
Figura 36 - Gráficos da temperatura inicial (40, 50 e 60 °C) do molde nos ciclos. ...	63
Figura 37 - Gráfico de comportamento da temperatura do molde durante o ciclo de injeção.....	64
Figura 38 - Gráfico da variação da temperatura do molde durante o ciclo de injeção .....	64

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características Arburg 370E 600 - Euromap 170.....	36
Tabela 2 - Propriedades do ABS AF360 da LG.....	37
Tabela 3 - Condições de processamento para estudo da influência da temperatura do molde e de injeção. ....	37
Tabela 4 - Condições com variação na pressão de comutação.....	38
Tabela 5 - Contração nos corpos de prova. ....	55
Tabela 6 - Contração na espessura dos corpos de prova.....	57

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABS - Acrilonitrila butadieno estireno

ANOVA – Análise de variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer aided design*

CAE – *Computer aided engineering*

NI – *National Instruments*

SWP – *SolidWorks Plastics*

T<sub>g</sub> – Temperatura de transição vítrea

T<sub>M</sub> – Temperatura de injeção

T<sub>w</sub> – Temperatura do molde

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b> .....	<b>15</b>
1.1. Objetivos .....	16
1.1.1. Objetivo Geral .....	16
1.1.2. Objetivos Específicos.....	16
1.2. Justificativa e relevância .....	16
<b>2. Revisão da literatura</b> .....	<b>18</b>
2.1. Polímeros .....	18
2.1.1. Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) .....	19
2.2. Moldagem de termoplásticos por injeção .....	20
2.2.1. Ciclo de Injeção .....	23
2.2.2. Contração de peças moldadas por injeção .....	25
2.2.3. Instrumentação de moldes.....	26
2.3. Linhas de Solda .....	28
2.4. Ensaio de Tração .....	31
2.5. Simulações CAE .....	32
<b>3. Materiais e Métodos</b> .....	<b>34</b>
3.1. Modelo e Molde.....	34
3.2. Injeção dos corpos de prova .....	36
3.2.1. Medição da Pressão .....	39
3.2.2. Medição da Temperatura .....	40
3.3 Simulação em SolidWorks <i>Plastics</i> .....	44
3.3.1. Avaliação de Pressão e Temperatura.....	45
3.4. Determinação da Contração e Massa.....	45
3.5. Ensaio de Tração .....	47
3.6. Análise dos dados.....	48
<b>4. Resultados e Discussões</b> .....	<b>49</b>

4.1. Defeitos Visuais .....	49
4.2. Massa.....	51
4.2.1. Análise de Variância .....	51
4.2.2. Pressão de comutação .....	52
4.3. Contração.....	53
4.3.1. Análise de variância.....	53
4.3.2. Comparação entre corpos de prova.....	55
4.3.3 Espessura .....	57
4.4. Ensaio de tração .....	58
4.4.1. Tensão de ruptura.....	59
4.4.2. Deformação na ruptura .....	60
4.4.3. Módulo de Elasticidade .....	61
4.5. Temperatura do molde .....	62
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>64</b>
<b>6. Recomendações para estudos futuros .....</b>	<b>66</b>
<b>Referências.....</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os polímeros representam uma parcela cada vez maior dos materiais utilizados na indústria. Com propriedades altamente diversificadas, atendem diversos segmentos do meio industrial, desde produtos simples como embalagens até próteses biomecânicas.

Além da flexibilidade de formulação, o baixo custo e a fácil processabilidade garantem a preferência dos polímeros aos demais materiais, como os metálicos e os cerâmicos, assegurando, assim, um material efetivo para diversas aplicações (Mundo do Plástico, 2016).

Para acompanhar o crescimento considerável do emprego destes materiais, os processos de transformação de polímeros foram sendo inovados e aperfeiçoados. Dentre os principais procedimentos utilizados, a moldagem por injeção de termoplásticos se destaca por aliar alta produtividade e complexidade da geometria da peça (HARADA; UEKI, 2012).

Assim como os demais processos de transformação, para ser competitiva, a injeção de polímeros deve garantir: alta produtividade e peças de qualidade. A possibilidade de integrar tecnologias *Computer Aided Engineering* (CAE) para a simulação do processo de injeção, desde seu modelamento em *Computer Aided Design* (CAD), permite evitar muitos defeitos nas peças ainda na etapa de projeto do molde, contribuindo com melhorias no processo.

Outros defeitos, mesmo previsíveis pelas simulações, não podem ser reparados alterando-se o molde, porém, é possível minimizá-los ou até mesmo eliminá-los durante o processo de injeção, por meio da otimização de parâmetros como temperatura e pressão (HARADA, 2004).

Um desses defeitos é a linha de solda, a qual ocorre quando há o encontro de duas frentes de fluxo. Além de imperfeições visuais, as linhas de solda podem apresentar propriedades mecânicas inferiores ao restante da peça. Isto advém principalmente por fatores como emaranhamento molecular incompleto do material, orientação desfavorável, formação de concentradores de tensão e presença de substâncias atípicas na face de encontro das frentes (MALLOY, 2010).

Desta forma, realizou-se um estudo acerca das melhores condições de processo para produzir peças com linha de solda, visando diminuir o efeito e aumentar a resistência mecânica. Para tanto, foi utilizado um molde instrumentado que força o encontro de frentes de fluxo em um corpo de prova de tração. Verificando de forma conjunta a estabilidade dimensional e a massa das peças injetadas com as condições analisadas.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Avaliar a influência da variação dos parâmetros de temperatura e da pressão de comutação no processo de injeção sobre as propriedades físicas e mecânicas em corpos de prova em ABS com presença de linhas de solda.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- a) Elaborar em Labview um sistema de monitoramento e aquisição de dados de temperatura do molde instrumentado durante o processo de injeção;
- b) realizar injeções de corpos de prova com as condições baseadas em delineamento experimental e com aquisição de dados de pressão na cavidade e de temperatura do molde;
- c) avaliar os efeitos da contração, massa e propriedades mecânicas dos corpos de prova por meio de medições e ensaios de tração.

## **1.2. Justificativa e relevância**

Linhas de solda são características comuns em peças produzidas pelo processo de injeção. Geralmente ocorrem por causa de obstáculos presentes no molde, os quais causam a divisão de uma frente de fluxo e sua junção após

contornar a forma. Tais defeitos, quando apresentam junção fraca, são indesejáveis e causam alterações nas propriedades mecânicas da peça.

Existem diferentes formas de eliminar ou diminuir as linhas de solda, entre elas, alterar a localização do ponto de injeção e retirar ou remodelar obstáculos. Entretanto, nem sempre é possível realizar essas modificações no molde, seja porque se trata de uma *feature* indispensável ou por interferir nos demais elementos presentes no molde, como os canais de resfriamento e os pinos extratores.

Sendo assim, muitas vezes é preciso trabalhar com os parâmetros do processo de injeção, tais como velocidade de injeção, temperatura de injeção, temperatura do molde, pressão de recalque, entre outros, para diminuir o efeito de formação da linha de solda. Esses parâmetros podem ser alterados desde que permaneçam dentro da janela de processamento do material. Portanto, compreender a influência dos mesmos sobre as linhas de solda é conveniente para a indústria de transformação de polímeros, não apenas para evitar as limitações dessa falha, mas também para facilitar a reconfiguração do processo quando houver troca de materiais.

Como os polímeros são suscetíveis a alterações em suas características devido à combinação com diferentes aditivos, o estudo dos efeitos dos parâmetros pode ser estendido para ajudar a minimizar que essa disposição reflita na peça injetada, principalmente em dimensão e massa.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Polímeros

Polímeros são macromoléculas formadas por muitas unidades de repetições denominadas meros, as quais se ligam por meio de ligações covalentes. Ou ainda, a composição de um polímero deriva de reações de polimerização de moléculas menores, os monômeros.

Sendo assim, um polímero pode ter cadeias com diferentes tamanhos e pesos moleculares e, conseqüentemente, diferentes propriedades e aplicações, uma vez que têm propriedades regidas pela combinação do peso molecular associado à sua estrutura química.

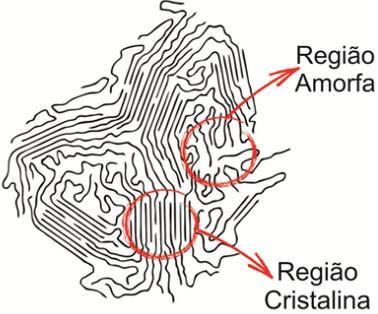
Segundo Manrich (2013), os polímeros podem ser divididos, em relação as suas características tecnológicas, em:

- a) Termoplásticos: são amolecidos quando aquecidos e solidificados quando resfriados em um processo reversível, no qual teoricamente não sofrem perdas de propriedade, ou seja, podem ser reusados.
- b) Termofixos: depois de aquecidos sofrem um processo de cura, onde ocorre degradação de sua estrutura química e a formação de ligações cruzadas que posteriormente impedem uma nova transformação aproveitável (CANEVAROLO, 2010).

Devido à capacidade de serem reprocessados, os termoplásticos são os mais utilizados na indústria de transformação de moldagem por injeção. Esses materiais por sua vez, possuem sua principal classificação quanto à estrutura molecular: os amorfos e os semi-cristalinos.

Os materiais amorfos são aqueles que possuem apenas cadeias desordenadas, enquanto os polímeros semicristalinos possuem regiões de fase amorfa e de fase ordenada ou cristalina. A Figura 1 ilustra a diferença das cadeias poliméricas dessa classificação, juntamente com algumas de suas propriedades praticamente opostas entre si.

Figura 1 - Morfologia e propriedades de um polímero (a) amorfo e de um (b) semicristalino.

<b>(a) Polímero Amorfo</b>	<b>(b) Polímero Semicristalino</b>
	
<p><u>Características:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Translúcidos;</li> <li>• Média resistência mecânica;</li> <li>• Baixa resistência à fadiga;</li> <li>• Faixa ampla de temperatura de fluidez;</li> <li>• Baixa contração.</li> </ul>	<p><u>Características:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opacos;</li> <li>• Alta resistência mecânica;</li> <li>• Alta resistência à fadiga;</li> <li>• Temperatura de fusão é bem definida ;</li> <li>• Alta contração.</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria.

### 2.1.1. Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

O ABS é um termoplástico amorfo formado pelos monômeros de acrilonitrila, butadieno e estireno, que tem suas propriedades influenciadas pela proporção de cada monômero em sua composição, podendo variar conforme as características individuais dos mesmos. A Figura 2 resume as principais contribuições de cada constituinte para os atributos do ABS.

Conforme Simieli e Santos (2010), a concentração de acrilonitrila favorece a melhoria das propriedades térmicas e químicas do ABS, devido à sua alta energia de coesão e parâmetro de solubilidade, porém, o aumento desse componente também causa diminuição da processabilidade do polímero. Já o butadieno influencia principalmente na resistência ao impacto, por ser um elastômero. Enquanto o estireno garante maior rigidez molecular proveniente do anel benzênico,

apesar de ser suscetível a reações químicas, que podem causar degradação e descoloração do material.

Figura 2 - Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.

<u>Acrilonitrila</u>	<u>Butadieno</u>	<u>Estireno</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência química;</li> <li>• resistência térmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência ao impacto;</li> <li>• tenacidade (baixas temperaturas).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brilho;</li> <li>• rigidez</li> <li>• processabilidade.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Simieli e Santos (2010).

O ABS tem uma temperatura de transição vítrea<sup>1</sup> ( $T_g$ ) baixa, que o torna ideal como modificador de impacto da matriz termoplástica. Juntamente com a melhora na resistência ao impacto, há o aumento da ductilidade e resistência à fadiga. Além de apresentar boa combinação de resistência à tração e dureza superficial. O baixo coeficiente de expansão térmica do ABS garante boa estabilidade dimensional e baixa contração. Simieli e Santos (2010) afirmam que essas propriedades aliadas a características como alto brilho e baixa densidade tornam o material ideal para o uso de diversas aplicações tais como, componentes automotivos, eletrodomésticos, computadores e utensílios domésticos.

Outra característica importante é sua boa propriedade dielétrica, a qual sofre poucas alterações independentes da temperatura e da umidade. Essa particularidade confere ao polímero a preferência em aplicações de injeção de gabinetes e suportes de produtos eletroeletrônicos.

## 2.2. Moldagem de termoplásticos por injeção

Em 2013, no Brasil, a moldagem por injeção representou 32% dos processos de transformação da indústria de plásticos, ficando atrás apenas da extrusão (Abiplast, 2016).

<sup>1</sup> Valor médio da faixa de temperatura a qual permite que a fase amorfa do material polimérico adquira mobilidade.

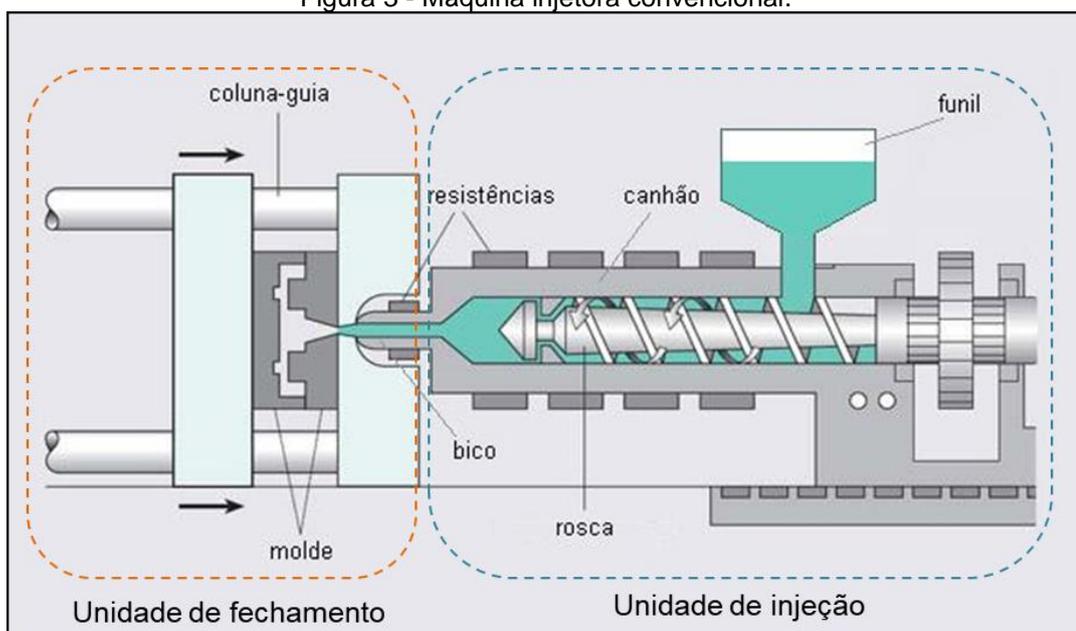
De acordo com Harada e Ueki (2012), a preferência pela injeção de termoplásticos a outros processos ocorre principalmente porque se trata de um dos procedimentos mais versáteis e modernos da indústria de transformação e processamento de polímeros, contando com avanços tecnológicos cada vez mais frequentes. Dentre suas diversas vantagens, ressalta-se: a característica de permitir a produção de peças em série e de geometria complexa, a elevada reprodutibilidade de detalhes e possibilidade de trabalhar com tolerâncias estreitas.

Assim como em outros processos de manufatura polimérica, na injeção, o material passa por três estágios (BIRLEY; BATCHELOR; HAWORTH, 1991):

- a) Plastificação: passagem do estado sólido para um de mobilidade, o qual permite a modificação da forma;
- b) Conformação: etapa em que o material adquire uma geometria definida pela forma de um molde ou matriz, com o auxílio, ou não, de uma pressão externa;
- c) Estabilização da forma: solidificação do material na forma da geometria na qual foi conformado.

No processo de moldagem por injeção, essas etapas são realizadas em uma máquina injetora, sendo suas principais partes: a unidade de injeção e a unidade de fechamento, como representado na Figura 3.

Figura 3 - Máquina injetora convencional.



Fonte: Adaptado de *A Plus Plastics*.

Na unidade de injeção, o polímero é depositado no funil de alimentação, o qual direciona o material até o canhão, onde é fundido devido ao calor proveniente das resistências elétricas e, principalmente, do calor derivado do cisalhamento induzido pela rotação de uma rosca. A rosca, além de fundir o material, é responsável pela homogeneização e transporte do polímero para o bico da injetora. O material começa a acumular na frente do canhão até atingir uma dosagem pré-estabelecida, então a rosca para de rotacionar. Devido à pressão do material no bico da injetora, a rosca se desloca axialmente para trás durante a dosagem com função de descompressão. Por fim, a rosca atua como um pistão empurrando o polímero pelo bico da injetora e preenchendo o molde, onde ficará mantido até sua solidificação (HARADA; UEKI, 2012).

O molde, segundo Manrich (2013), é o componente que define a geometria final da peça. Os moldes convencionais mais simples, geralmente, possuem duas placas: uma fixa e uma móvel. A placa fixa localiza-se no lado do bico, enquanto a placa móvel realiza o deslocamento para a abertura e fechamento do molde. Nessas placas, além das cavidades com o formato das peças, também se localizam o canal de injeção, os canais de alimentação e distribuição, canais de resfriamento e pinos extratores.

Conforme Harada e Ueki (2012), a unidade de fechamento é responsável por realizar a movimentação do molde (abertura e fechamento), em aplicar uma força no molde para mantê-lo fechado durante a injeção e pela movimentação necessária para a extração da peça.

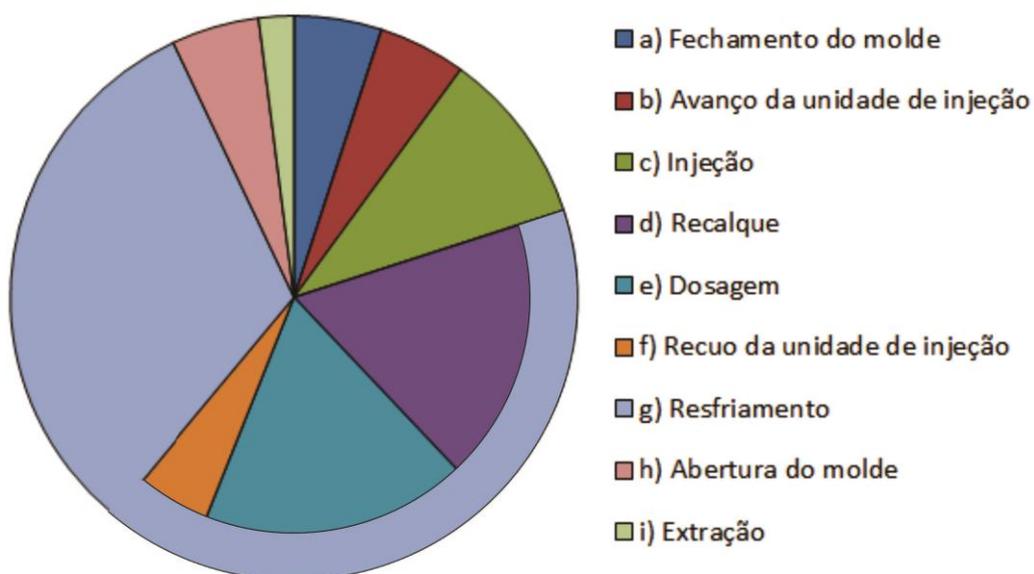
Desse modo, algumas características são importantes para garantir que a injetora consiga produzir a peça almejada, como: máxima pressão de injeção, capacidade de injeção (volume máximo de injeção), diâmetro da rosca, força de fechamento, distância entre colunas, curso entre placas, entre outros.

A máquina injetora ainda conta com a unidade de resfriamento e de comando, responsáveis pela manutenção da temperatura do sistema e controle do processo, respectivamente.

### 2.2.1. Ciclo de Injeção

A injeção é um processo que ocorre de forma cíclica em que algumas etapas ocorrem de forma simultânea e outras de forma sequencial (MANRICH, 2013). A Figura 4 representa o ciclo de moldagem por injeção convencional conforme suas etapas definidas por Harada e Ueki (2012) e Pötsch e Michaeli (1995):

Figura 4 - Ciclo de injeção convencional.



Fonte: Adaptado de Harada e Ueki (2012).

- a) O ciclo inicia pelo **fechamento do molde**, que é definido pelo perfil de velocidade e pela força de fechamento.
- b) Em seguida, há o **avanço da unidade de injeção** para encostar o bico de injeção na entrada do molde, caso esteja desencostado.
- c) Inicia-se a etapa de **injeção**, ou preenchimento, onde material dosado será injetado dentro da cavidade do molde por meio da rosca funcionando como pistão, seus principais parâmetros são a velocidade de injeção, a pressão máxima de injeção e a temperatura de injeção (definida pelo perfil de temperatura na rosca e no bico).
- d) Ocorre a comutação para etapa de **recalque**, ou compensação, na qual ocorre o controle de pressão no material dentro do molde realizado pela rosca com a injeção de mais material na cavidade. O objetivo desse procedimento é compensar a contração do material

devido ao resfriamento do mesmo no interior da cavidade, mantendo as dimensões dentro das especificações e evitando defeitos como o rechupe. Nesta etapa, deve ser definido o perfil de pressão de recalque e, conseqüentemente, o tempo e a pressão utilizada.

- e) A **dosagem** inicia após o recalque, o material é transportado para frente da rosca na quantidade dosada para o próximo ciclo. Para isso, estipula-se: o volume dosificado (posição da rosca), rotação rosca e contrapressão.
- f) Para separar o material na bucha do molde do material no bico de injeção realiza-se o **recuo da unidade de injeção**, podendo ser feito antes da etapa de dosagem.
- g) Simultaneamente à dosagem e ao recuo da unidade de injeção, logo após o recalque, ocorre a etapa de **resfriamento**. Na qual, espera-se o polímero dentro do molde se solidificar, garantindo a estabilidade da forma. O processo de resfriamento em si, começa desde o momento do contato do material fundido com as paredes do molde. Porém, para definir o tempo de resfriamento é preciso definir um início e fim para o mesmo, geralmente se considera o início após o fim do recalque. É parametrizado pelo tempo de resfriamento, o qual se determina de acordo com a temperatura de extração, tipo de material, temperatura do molde e temperatura de injeção.
- h) Com o fim do tempo de resfriamento, acontece a **abertura do molde**, controlando-se principalmente a velocidade de deslocamento do mesmo.
- i) Para finalizar o ciclo, a **extração** da peça é realizada por meio da movimentação dos pinos extratores. O deslocamento não precisa acontecer somente após a abertura completa do molde, de forma que enquanto este recue, os pinos avancem de forma sincronizada para que a peça seja completamente extraída ao final da abertura.

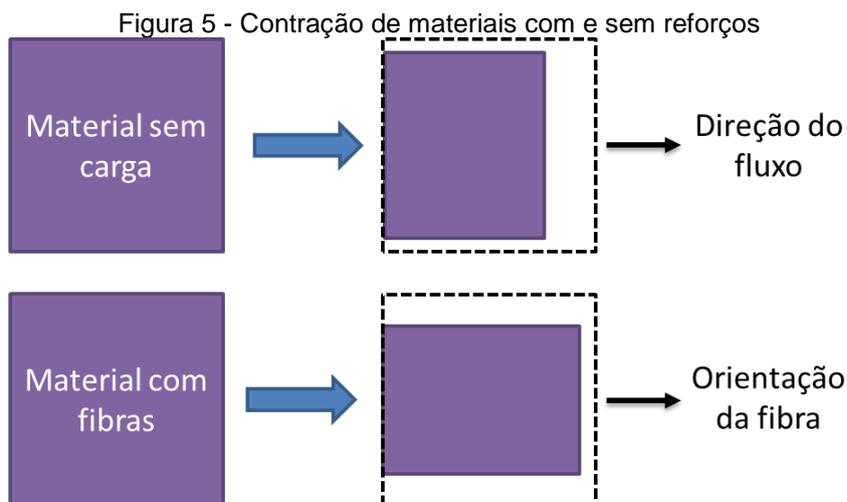
### 2.2.2. Contração de peças moldadas por injeção

A contração de peças moldadas por injeção é referente à diferença entre as dimensões de uma peça em temperatura ambiente e as dimensões do molde, geralmente apresentada em porcentagem (%) com relação à dimensão do molde, conforme apresenta a equação 1. Como ao entrar na cavidade o material se encontra com uma temperatura elevada, a contração se torna uma característica natural de peças obtidas por esse processo. Além da contração térmica, a relaxação da orientação molecular e a cristalização também são causas da contração de peças injetadas.

$$\text{Contração} = \frac{(\text{dimensão do molde} - \text{dimensão da peça})}{\text{dimensão do molde}} \times 100 \quad (1)$$

A cristalização é o reordenamento das cadeias do polímero, ou seja, a formação das regiões cristalinas do material semicristalino. Sendo uma característica apenas desse material, esse fator faz com que os materiais semicristalinos sofram uma contração final maior que os polímeros amorfos. Como o grau de cristalização varia conforme o material e as condições de processamento, a tolerância dimensional para esses materiais é mais difícil de ser mantida (HARADA; UEKI, 2012).

Em termos de orientação molecular, a contração é maior na direção do fluxo do que na direção transversal nos polímeros em geral. Nos materiais amorfos as moléculas acabam se reorientando para um estado mais aleatório, enquanto nos semicristalinos as cadeias poliméricas formam regiões ordenadas e mais densas. Para polímeros com adição de cargas ou reforços a contração na direção do fluxo se torna limitada, tornando a contração transversal superior, a Figura 5 demonstra o efeito do uso de reforços com fibra na contração do material.



Fonte: Adaptado de Harada e Ueki (2012).

Quanto à contração térmica, nos materiais amorfos também ocorre com menor amplitude, uma vez que está diretamente relacionada com a variação do volume específico durante o processo de injeção. Essa variação é determinada a partir do momento em que não há mais entrada de massa na cavidade e a pressão da mesma é igualada a pressão da atmosfera, ou seja, no final do recalque e segue até a estabilização em temperatura ambiente.

### 2.2.3. Instrumentação de moldes

Peças moldadas por injeção têm propriedades dependentes das condições de processamento, afetando diretamente em sua qualidade. Apesar desse vínculo ser conhecido, muitas vezes o comportamento entre as variáveis do material, de operação, da máquina ou projeto do molde e a qualidade final da peça é complexo, uma vez que cada condição de injeção pode gerar diferentes resultados (BECKER, 2012).

Segundo Becker (2012), diante da aspiração de fornecer um produto de qualidade, o controle na produção de moldagem por injeção pode representar um diferencial competitivo. Com essa finalidade, conhecer como as principais variáveis do processo afetam o comportamento do material no interior da cavidade se torna uma premissa indispensável. Por isto, os sistemas de aquisição de dados e sensores para monitorar e controlar o processo de injeção são ferramentas promissoras para a indústria moderna.

Máquinas de injeção automatizadas já contam com instrumentação própria, porém dificilmente as grandezas lidas pelos sensores da máquina se reproduzem na cavidade do molde. Fornecendo, apenas, dados para gerar estimativas do comportamento do material dentro do molde. Desta forma, a instrumentação dos moldes permite o monitoramento real de variáveis como a temperatura e a pressão real do material na cavidade.

O perfil da temperatura e da pressão da cavidade são uns dos principais parâmetros que influenciam a qualidade da peça, tanto em propriedades mecânicas e estabilidade dimensional até qualidade superficial (HUANG, 2006). A repetitividade dos mesmos permite manter a alta qualidade e ajudar no controle da máquina (GORDON JR, 2006).

A utilização de sensores no molde viabiliza o monitoramento dos locais onde as falhas e ocorrências de defeitos são mais suscetíveis, permitindo otimizar os parâmetros de temperatura e pressão para que os mesmos evitem comportamentos indesejáveis das peças, tendo em vista que se conhece a influências dos parâmetros reais sobre os possíveis defeitos.

Segundo Gordon Jr (2006), além de permitir o monitoramento de variáveis, os sensores também podem atuar como dispositivos de controle, dependendo da tecnologia disponível na máquina. Um exemplo é a realização do controle da comutação das etapas de preenchimento e recalque por meio da pressão de uma determinada região da cavidade.

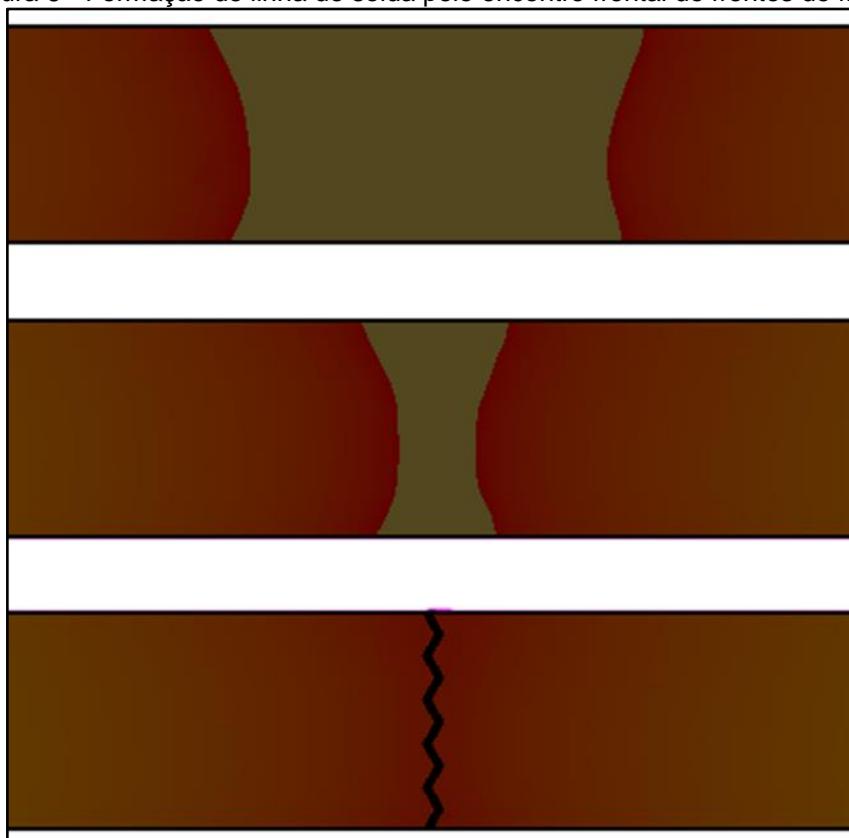
A vantagem da comutação dependente da pressão da cavidade garantiria que a região verificada chegaria à pressão desejada antes da comutação. Eliminando imprecisões derivadas de variações na dosagem ou mau funcionamento das válvulas de não retorno (APOSTILA..., 2008).

Visando esse tipo de comutação, a localização o transdutor na região de entrada pode fornecer informações importantes sobre o processo, mas não é a melhor região para se basear, considerando que estaria sujeita a flutuações na temperatura do fundido. A melhor disposição seria ao fim do caminho de fluxo, onde as variações seriam menores e é possível assegurar e controlar o grau de preenchimento (PÖTSCH; MICHAELI, 1995).

### 2.3. Linhas de Solda

Em peças moldadas pelo processo de injeção as linhas de soldas são formadas pelo encontro e união de diferentes frentes de fluxo, como se pode observar na Figura 6. Podendo ser causadas pela divisão de frente de fluxo ao contornar obstáculos ou furos seguidos de sua junção, pela variação na espessura da parede, na injeção com múltiplas entradas ou até mesmo como consequência de outra falha, o jateamento (WU; LIANG, 2005).

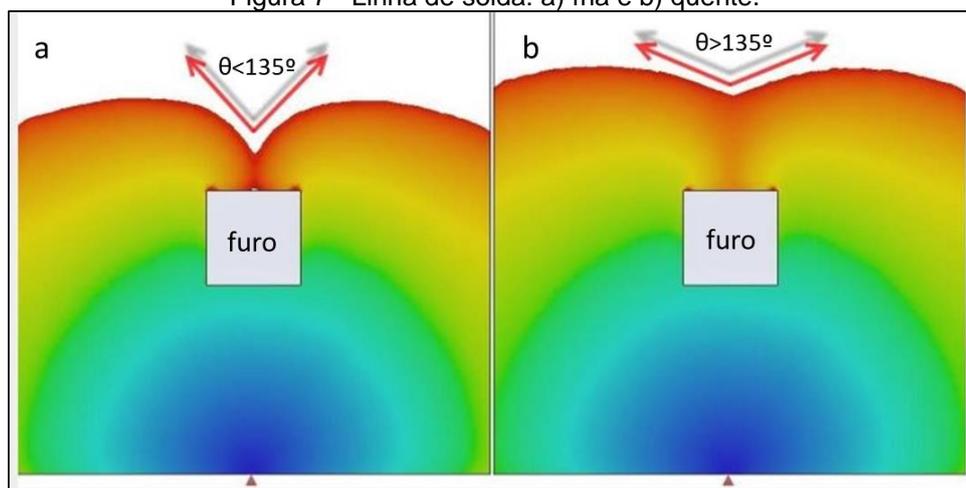
Figura 6 - Formação de linha de solda pelo encontro frontal de frentes de fluxo.



Fonte: Elaboração própria.

Quando a linha de solda é formada pelo encontro de frentes de fluxo que caminham em sentidos opostos ou no seu ponto de encontro formam ângulos de até  $135^\circ$  é considerada uma linha de solda fria, já para ângulos maiores que esse valor ou para um encontro lateral são chamadas linhas de solda quente e são propícias a possuírem uma resistência superior às anteriores (HARADA; UEKI, 2012; MALLOY, 1994). A Figura 7 exemplifica a formação dessas linhas.

Figura 7 - Linha de solda: a) fria e b) quente.



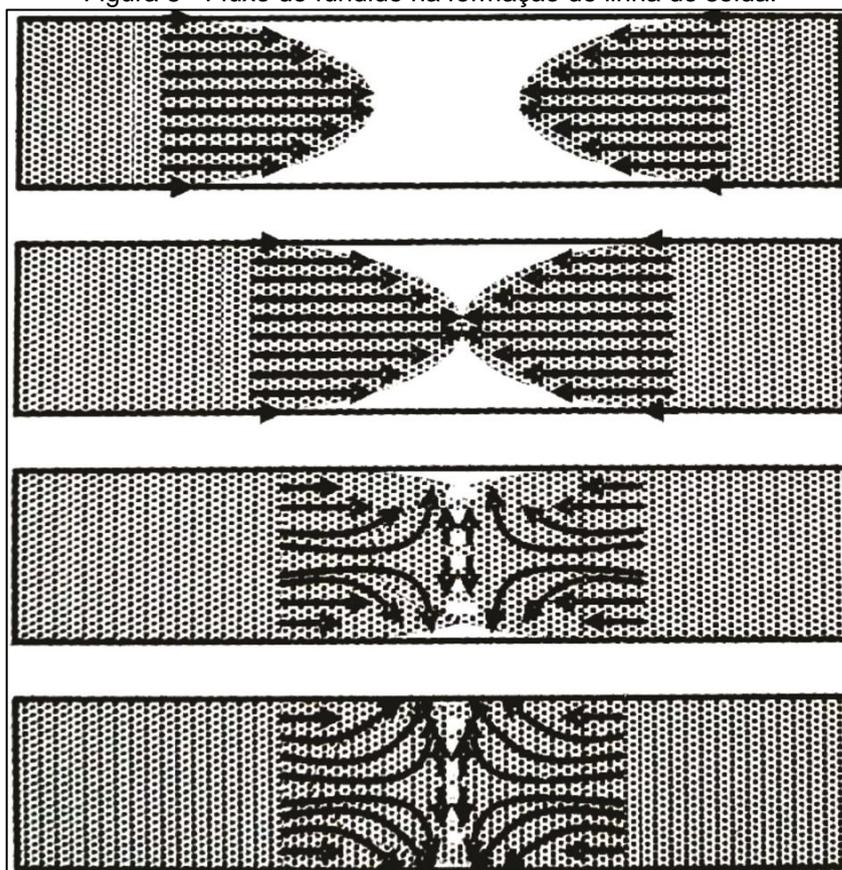
Fonte: Adaptado de GoEngineer.

A linha de solda fria é um defeito muito significativo para as propriedades mecânicas da peça moldada, principalmente com a diminuição da resistência mecânica, sendo que também pode gerar degradação do material pelo efeito diesel devido à compressão do ar na junção e, em alguns casos, as linhas de solda podem ocasionar pontos de concentração de tensão, além de causar fissuras visíveis na superfície da peça moldada (HARADA, 2004).

Malloy (1994) afirma que a fragilidade da linha de solda deriva principalmente de fatores como: emaranhamento molecular incompleto, orientação molecular desfavorável, formação de pontos de concentração em V e presença de resíduos e ar na junção das frentes. A Figura 8 representa a orientação molecular do polímero fundido na formação da linha de solda pelo encontro das frentes de fluxo.

Muitas vezes essas falhas podem ser diminuídas ou até mesmo eliminadas por meio de alterações na geometria da peça, na geometria do molde ou na seleção de um *grade* diferente do material. Porém, nem sempre essas mudanças são possíveis de serem realizadas, sendo necessário encontrar uma combinação de parâmetros de processamento a fim de minimizar a formação dessas linhas.

Figura 8 - Fluxo do fundido na formação de linha de solda.



Fonte: Manrich (2014).

Segundo Manrich (2013), o aumento da temperatura de injeção tende a aumentar a qualidade da linha de solda, uma vez que a energia vibracional das moléculas do polímero está relacionada com o calor interno da massa, de modo a favorecer uma característica mais isotrópica na região da linha de solda. Outra solução seria o aumento da velocidade de injeção, visto que o material tende a diminuir a temperatura ao encontrar o molde e uma velocidade maior compensaria essa perda por meio do calor gerado pelo atrito.

Chen et al. (2007) reforça a influência da temperatura de injeção na resistência da linha de solda, bem como afirma que a temperatura do molde se comporta similar, melhorando o emaranhamento das moléculas e reduzindo a tensão residual.

## 2.4. Ensaio de Tração

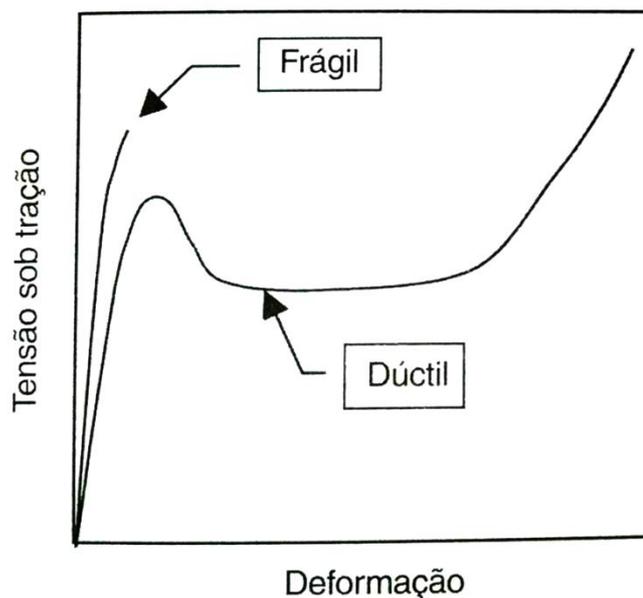
O ensaio de tração é um ensaio do tipo destrutivo que serve para determinar propriedades mecânicas de uma geometria, sendo um dos mais utilizados na indústria, por ser rápido e de fácil execução. Outras vantagens consistem: na quantidade de informações fornecida, na flexibilidade do método e no fato de pode ser realizado em quase todos os tipos de materiais (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2013).

O método consiste em aplicar uma carga de tração axial em um corpo de prova até sua ruptura, com procedimentos regidos pela norma NBR ISO 6892. Tendo como resultado uma curva tensão-deformação, derivada da variação de comprimento por carga. Com essa curva é possível quantificar algumas características mecânicas dos materiais, dentre elas:

- a) Módulo de Elasticidade (E): uma forma de indicação de rigidez do material, definida pela razão da variação da tensão pela variação da deformação na região linear da curva, ou seja, pelo coeficiente linear da reta. Logo, quanto maior o módulo de elasticidade, menor é sua deformação elástica.
- b) Tensão de ruptura: tensão no momento da ruptura.
- c) Módulo de tenacidade: um meio de quantificar a facilidade do material em fraturar.
- d) Limite de resistência à tração: dado pela relação da carga máxima aplicada pela área da secção transversal inicial.

A curva ainda é capaz de identificar se o material é frágil, ou dúctil, por meio do formato da curva, sendo que os corpos frágeis não tem a região de deformação plástica, pois se rompem antes. A Figura 9 exemplifica uma curva tensão-deformação com ambos os comportamentos. Materiais dúcteis possuem além da região elástica, uma região plástica com onde ocorre uma deformação permanente.

Figura 9 - Exemplo do comportamento dos materiais em uma curta tensão-deformação.



Fonte: Canevarolo Jr.(2010).

## 2.5. Simulações CAE

Simulações CAE modelam computacionalmente um problema real de acordo com as leis físicas que o descreve (HARADA; UEKI, 2012). Trata-se de ferramentas que auxiliam a engenharia por meio do computador, desempenhando um papel fundamental para a viabilização de um projeto de produto.

Na moldagem por injeção de termoplásticos, as ferramentas de auxílio computacional permitem o aperfeiçoamento de várias etapas de projeto, como: na concepção do produto, a fim de adequá-lo ao processo de moldagem por injeção; no desenvolvimento e manutenção do molde e na otimização do ciclo de moldagem da peça. Possibilitando minimizar erros de projeto e reduzir custo de desenvolvimento de novos produtos.

A possibilidade de simular diversos processos de injeção com diferentes materiais e parâmetros de processamento, oportuniza melhorias tais quais: otimização da localização das entradas de injeção, redução do tempo de ciclo de injeção, aprimoramento do perfil de injeção, verificação da necessidade de saída de gases, estimativa de tensões residuais, previsão de empenamento e prováveis soluções, localização e controle de linhas de solda, otimização de circuitos de

resfriamento, redução do tempo de desenvolvimento do molde, redução do número do número de *tryouts* e eliminação de retrabalho no ferramental (HARADA; UEKI, 2012).

Uma das ferramentas CAE disponíveis para o processo de injeção é o Solidworks *Plastics* (SWP) que permite a simulação do processo a partir do próprio modelo da peça que será fabricada contando com todas as vantagens descritas acima. O software simula as etapas de injeção, recalque e resfriamento, além de empenamentos e contrações.

O SWP utiliza métodos de diferenças finitas para realizar suas análises, partindo de elementos e volumes finitos para definir uma malha para a peça de estudo. Assim, para cada componente da malha são calculadas as equações que regem a propriedade em estudo, possibilitando simular o comportamento total da peça. Na simulação por injeção destacam-se os modelos matemáticos de escoamento e o modelo viscoelástico para determinar o comportamento do material fundido na etapa de preenchimento.

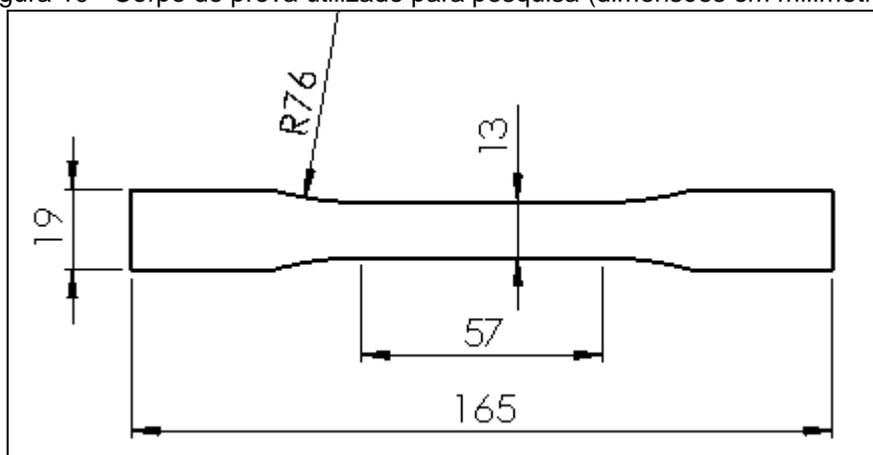
Miranda et al., (2017) afirma que a ferramenta consegue reproduzir o comportamento do processo de injeção ao se variar a pressão e temperatura com pouco desvios de simulação, porém, apresenta uma leve deficiência quanto aos resultados dos fenômenos viscoelásticos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Modelo e Molde

Objetivando-se determinar as propriedades da linha de solda por meio de um ensaio de tração, a peça injetada reproduz a formação de dois corpos de prova de tração, os quais foram projetados com base em corpos de prova padrão do tipo I determinados pela norma ASTM D638, e também pela antiga NBR ISO 9622. O dimensionamento aproximado dos corpos pode ser observado na Figura 10, sendo a espessura utilizada de 2mm.

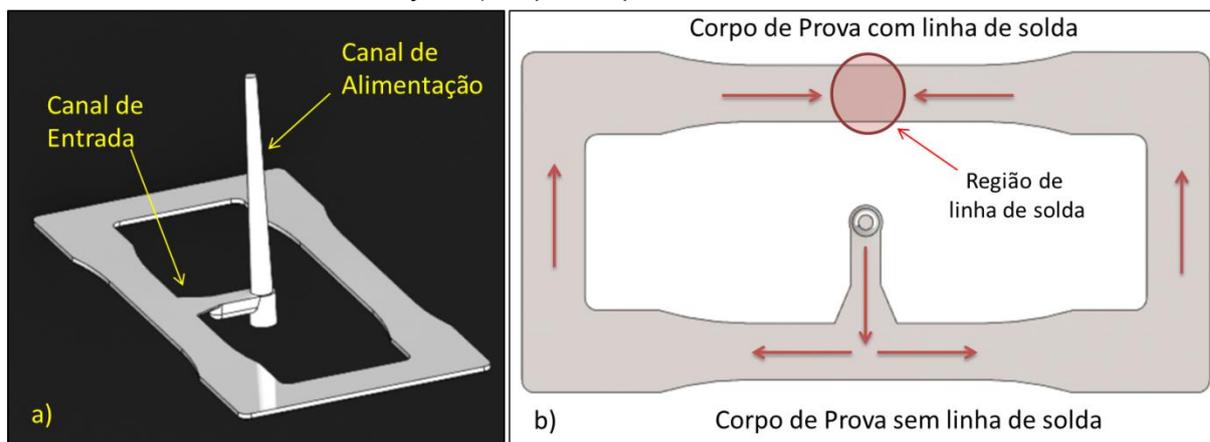
Figura 10 - Corpo de prova utilizado para pesquisa (dimensões em milímetros).



Fonte: Elaboração própria.

A peça foi modelada de forma que um corpo de prova ficasse localizado na entrada do canal de entrada, gerando uma região de divisão da frente de fluxo e um corpo sem a existência da linha de solda. O outro lado do modelo contém o segundo corpo de prova, esse por sua vez, recebe as duas frentes de fluxo forçando a formação da linha de solda, o modelo de estudo pode ser observado na Figura 11.

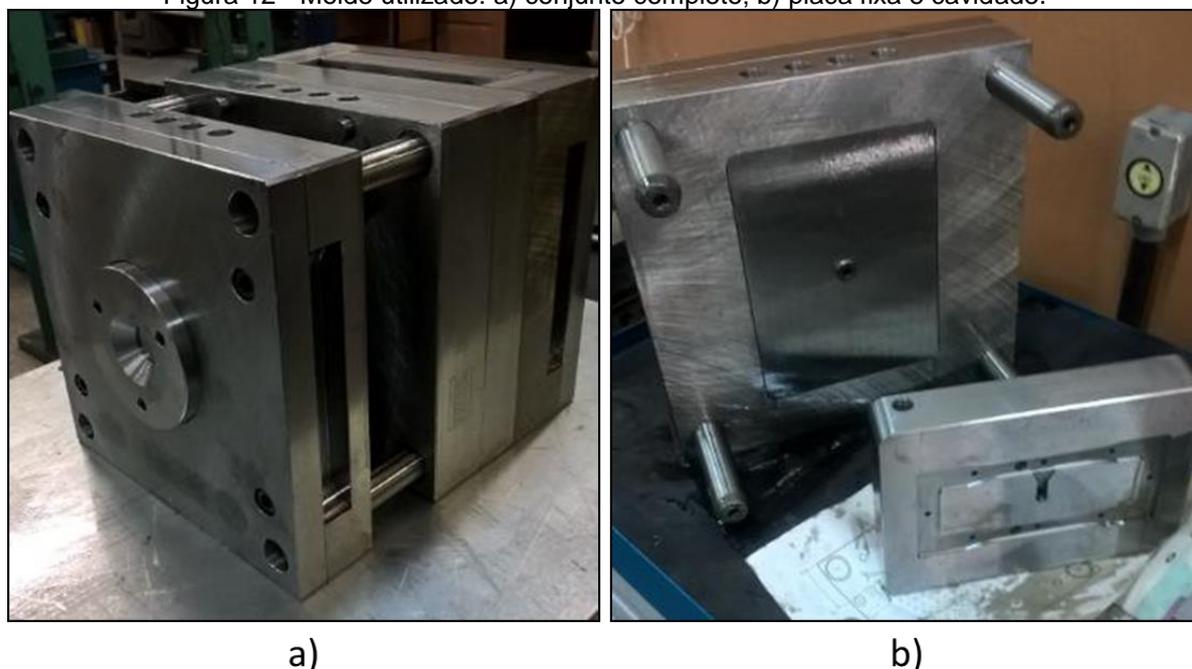
Figura 11 - Modelo CAD da peça injetada com identificação de: a) canal de entrada e canal de alimentação; b) corpos de prova e fluxo do material.



Fonte: Elaboração própria.

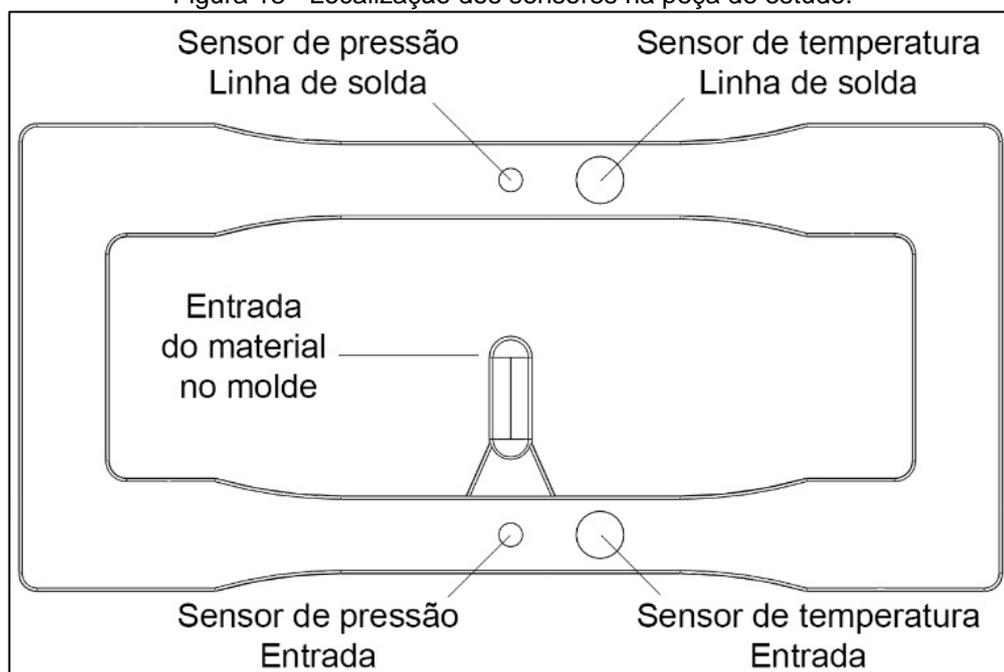
O molde responsável pela fabricação dessas peças (Figura 12) foi projetado em um estudo anterior de Oliveira (2017), com o objetivo de auxiliar estudos acerca da formação de linhas de solda. O mesmo foi instrumentado, permitindo o sensoriamento da pressão na região de entrada da cavidade e também da pressão e temperatura na região da linha de solda. A localização dos transdutores utilizados pode ser observada na Figura 13.

Figura 12 - Molde utilizado: a) conjunto completo; b) placa fixa e cavidade.



Fonte: Oliveira (2017).

Figura 13 - Localização dos sensores na peça de estudo.



Fonte: Oliveira et. al (2017).

### 3.2. Injeção dos corpos de prova

A máquina de injeção utilizada para realizar a produção dos corpos de prova foi a injetora Arburg 370 E 600 - Euromap 170, suas principais características podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características Arburg 370E 600 - Euromap 170.

Especificação	Valor
Diâmetro da rosca	30 mm
Distância entre colunas	370 mm
Volume de injeção	85 cm <sup>3</sup>
Força de fechamento	600 kN
Pressão máxima de injeção	2000 bar

Fonte: Elaboração própria.

O termoplástico empregado foi um ABS da LG, o *grade* AF360 de cor branca, algumas propriedades do material e parâmetros de processamento para moldagem por injeção foram verificados da folha de dados do fornecedor e podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do ABS AF360 da LG.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Índice de Fluidez	26	g/10min
Contração	0,4 - 0,7	%
Módulo de Elasticidade	2100	MPa
Tensão de Escoamento	37	MPa
Deformação	20	%
<b>Parâmetros de Processamento</b>		
Temperatura de injeção	200 - 230	°C
Temperatura do molde	40-60	°C

Fonte: Elaboração própria.

Na primeira etapa, a injeção dos corpos de prova seguiu um planejamento de experimento fatorial, variando os parâmetros de: temperatura de injeção ( $T_I$ ) e temperatura do molde ( $T_M$ ). Cada fator foi estudado em três níveis, definidos de acordo com a faixa de processamento do material fornecido pela folha de dados do mesmo (Tabela 3). Ou seja, o estudo foi realizado em duas variáveis a três níveis, resultando em nove condições de processo, as quais foram identificadas conforme a sequência de execução das injeções. Para cada condição, injetaram-se 12 peças, realizando 6 aquisições de dados no lado de entrada da peça e 6 na linha de solda.

A definição de três níveis (mínimo, médio e máximo) resultou para a temperatura do molde os valores de 40, 50 e 60°C, e para a temperatura de injeção os valores de 200, 215 e 230°C. Definiu-se um perfil de temperatura crescente no cilindro de injeção até o bico, para evitar alterações bruscas entre as temperaturas das regiões da rosca e a temperatura de injeção.

Tabela 3 - Condições de processamento para estudo da influência das temperaturas do molde e de injeção.

<b>Condição</b>	<b>Temperatura do Molde (°C)</b>	<b>Temperatura de Injeção (°C)</b>	<b>Perfil de Temperatura do Cilindro Bico → Funil</b>
<b>1 – m40/i200</b>	40	200	200/195/190/185/180
<b>2 – m40/i215</b>	40	215	215/205/195/190/180
<b>3 – m40/i230</b>	40	230	230/220/210/190/180
<b>4 – m50/i200</b>	50	200	200/195/190/185/180
<b>5 – m50/i215</b>	50	215	215/205/195/190/180
<b>6 – m50/i230</b>	50	230	230/220/210/190/180
<b>7 – m60/i200</b>	60	200	200/195/190/185/180
<b>8 – m60/i215</b>	60	215	215/205/195/190/180
<b>9 – m60/i230</b>	60	230	230/220/210/190/180

Fonte: Elaboração própria

Além das 9 condições com variação dos parâmetros de temperatura, em uma segunda etapa, foram injetados corpos de prova com controle da comutação da fase de injeção para a fase de recalque por meio da pressão na cavidade, utilizando o sensor da região de linha de solda. Nesta etapa foi definida a fabricação de 5 peças por ensaio, variando a pressão de comutação em uma faixa de 25 a 50 bar com incremento de 5 bar a cada teste, totalizando 6 condições (Tabela 4). Nos ensaios mencionados foi mantida a condição 5, a qual aplicou os valores de nível médio de temperatura de injeção e temperatura do molde, sendo 215°C e 50°C, respectivamente.

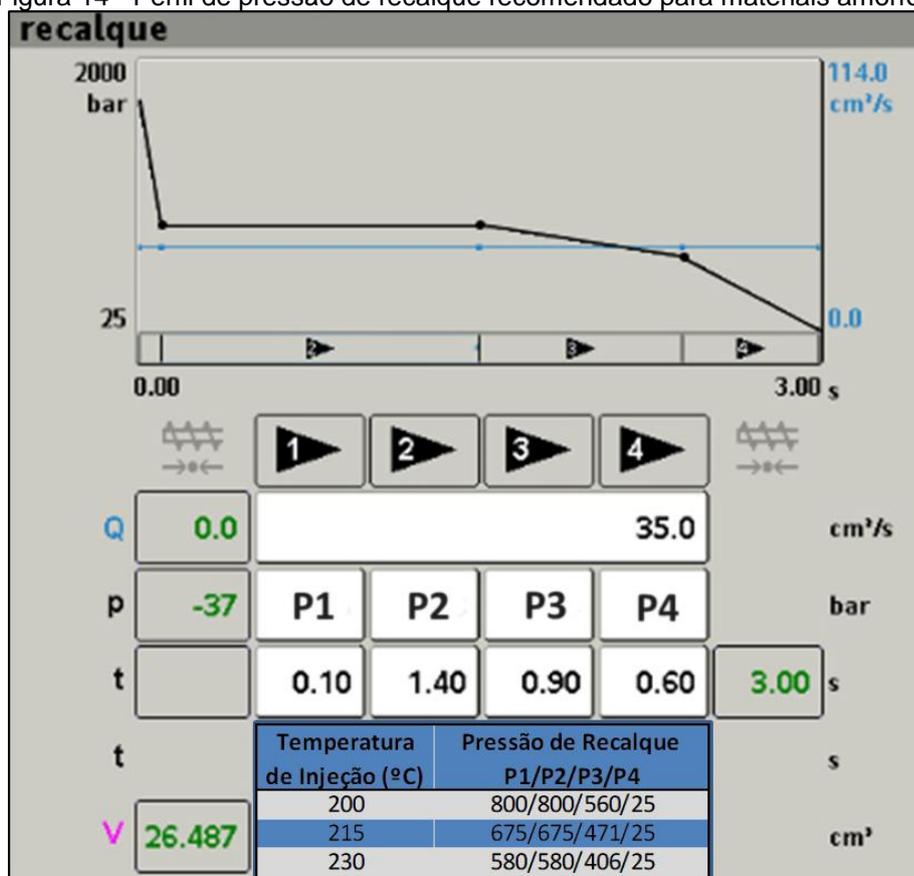
Tabela 4 - Condições com variação na pressão de comutação

<b>Condição</b>	<b>Pressão de Comutação (bar)</b>
<b>10 – p25</b>	25
<b>11 – p30</b>	30
<b>12 – p35</b>	35
<b>13 – p40</b>	40
<b>14 – p45</b>	45
<b>15 – p50</b>	50

Fonte: Elaboração própria.

Para a etapa de recalque, definiu-se um perfil de pressão para materiais amorfos (Figura 14) conforme recomendações da Arburg (APOSTILA..., 2010). O tempo de recalque e de resfriamento foram estabelecidos de acordo com a espessura da peça, com o tempo total de resfriamento de 10 segundos, a recomendação seguida estipulava a divisão desse tempo em 30% para a fase de recalque e 70% para o resfriamento puro, resultando em 3 e 7 segundos, respectivamente.

Figura 14 - Perfil de pressão de recalque recomendado para materiais amorfos.



Fonte: Elaboração própria.

Definiram-se os valores de pressão de recalque inicial em 60% da pressão de injeção (valor comumente utilizado no processo), seguida de uma queda para também 60% desse valor e, por fim, determinada uma pressão de “manutenção” em 25 bar. Esses valores foram alterados conforme a temperatura de injeção, a qual possui maior influência sobre a pressão de injeção.

### 3.2.1. Medição da Pressão

Durante o processo de injeção dos corpos de prova foram realizadas aquisições de temperatura e pressão do molde instrumentado. O qual portava dois sensores de pressão piezoelétricos do grupo “ds60xx\_094e” da PRIAMUS, os quais são próprios para aferir pressão na cavidade de moldes, podendo realizar leituras em uma faixa de 0 a 2000 bar.

Os transdutores de pressão foram lidos por um módulo da PRIAMUS, já adaptado para comunicação com o sistema de controle da Arburg, o SELOGICA.

Contudo, por ter apenas um canal, o módulo limitou a aquisição dos sinais, impedindo a leitura simultânea dos transdutores de entrada e saída.

Além de fornecer dados de leitura para o protocolo das primeiras 9 condições e permitir a construção gráfica dessas aquisições pelo controlador da máquina, esse módulo possibilitou a realização da segunda etapa de fabricação dos corpos, em que a comutação era controlada pelo sensor da região da linha de solda.

### **3.2.2. Medição da Temperatura**

O transdutor de temperatura da região de linha de solda é um termopar do tipo N do grupo “ds40xx\_097e” da PRIAMUS, o qual é específico para ser utilizado na cavidade de moldes de injeção e pode atuar em temperaturas superiores a 600°C com variações de até 0,4% do valor lido. Para a aquisição de dados gerados pelo mesmo, implementou-se um sistema externo constituído de:

- a) Módulo CompactDAQ da National Instruments (NI) com chassi com comunicação Ethernet;
- b) módulo digital NI-9375 da NI para plataforma CompactDAQ;
- c) módulo de leitura de termopares NI-9214 da NI para plataforma CompactDAQ;
- d) sensor indutivo tipo PNP;
- e) PC com software LabView;
- f) fonte de 12V.

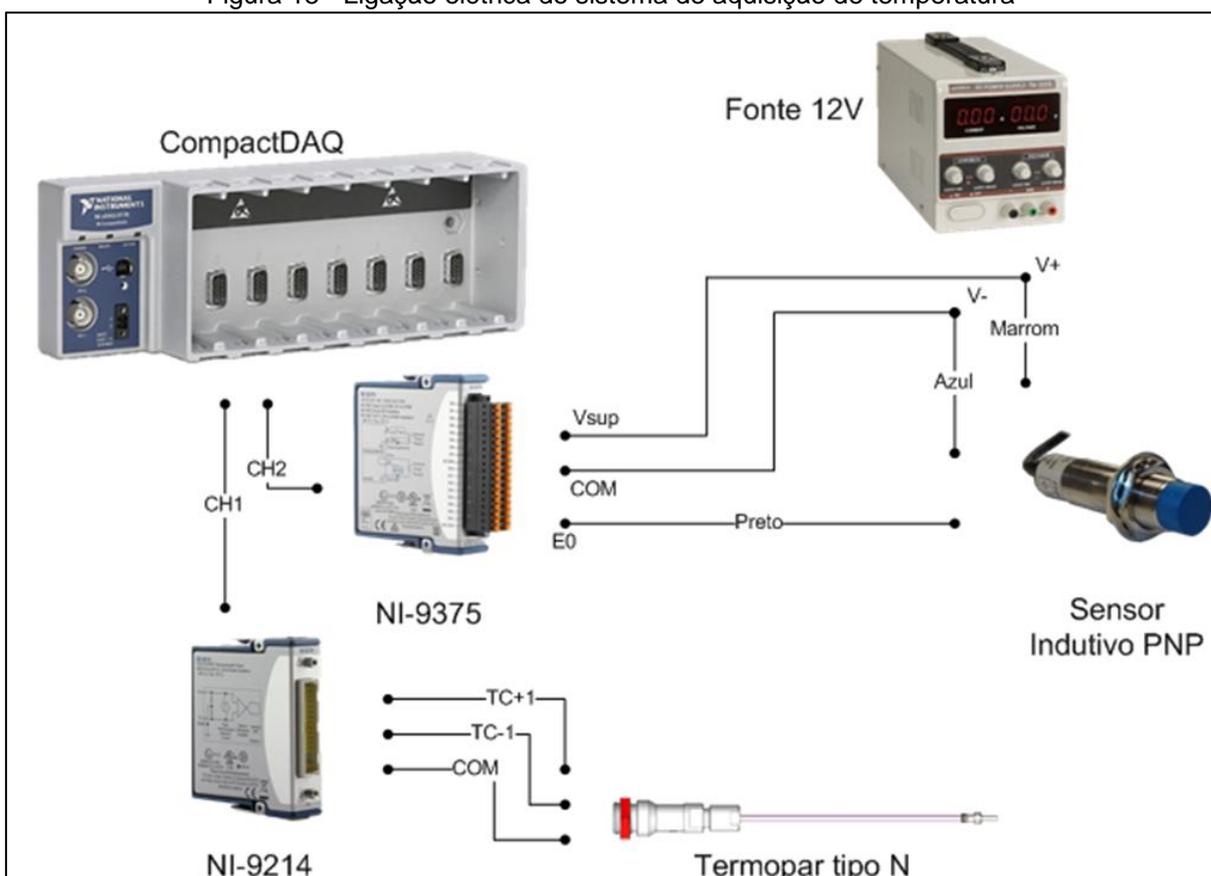
O módulo CompactDAQ permite a integração de diversos módulos da NI, de forma a torná-lo flexível quanto suas aplicações. Além de ser uma plataforma portátil de aquisição de dados.

O módulo NI-9214 permite, exclusivamente, a leitura de termopares. Possui 16 canais, os quais possuem na entrada: uma impedância, um detector de corrente, um amplificador multiplexador e um conversor analógico-digital de 24 bits. A ligação do termopar nesse dispositivo é feita de forma direta, conectando-o em algum dos canais disponíveis e também ao comum do módulo. O hardware ainda permite a calibração dos termopares conforme sua classe.

O sensor indutivo foi introduzindo ao sistema, pois, objetivou-se realizar a leitura da temperatura apenas com o fechamento do molde. Portanto, a aquisição seria iniciada no fechamento e finalizada na abertura do molde, não se monitorando o ciclo seco. Posicionou-se o dispositivo sobre uma coluna guia da injetora no espaço entre a placa fixa e móvel do molde, de modo que a distância entre o sensor e a placa móvel fosse menor que 4 milímetros (região de leitura do sensor) quando o molde estivesse fechado.

A leitura do sensor indutivo foi feita por meio de uma entrada digital no módulo NI-9375 e a ligação entre esses componentes realizou-se conforme a Figura 15. Tanto o módulo digital quanto o sensor precisavam de uma alimentação externa, para fornecer a mesma tensão a ambos, optou-se por um valor de 12V, utilizando uma fonte regulável de bancada para obtê-la.

Figura 15 - Ligação elétrica do sistema de aquisição de temperatura

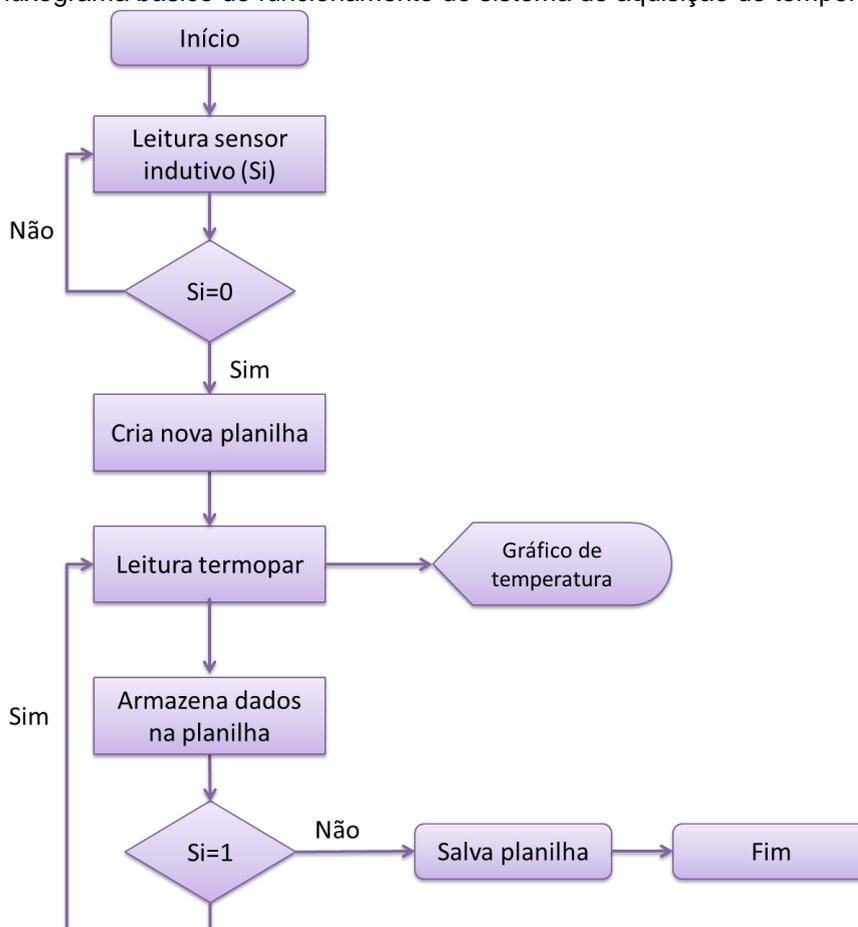


Fonte: Elaboração própria

O CompactDAQ permite a comunicação com o PC, que controla o sistema por meio do software LabView da NI. O software se baseia em uma sintaxe de programação gráfica que facilita a implementação de projetos. A rotina de

programação foi definida de acordo com o fluxograma simplificado apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma básico do funcionamento do sistema de aquisição de temperatura do ciclo

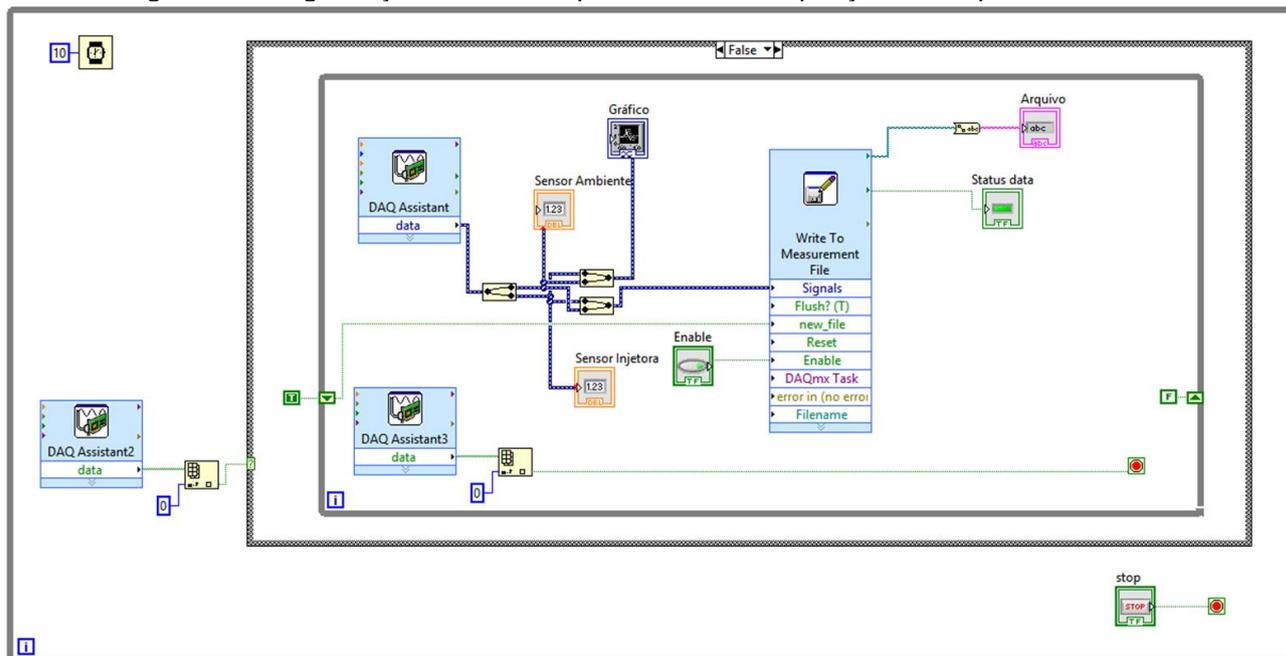


Fonte: Elaboração própria.

O reconhecimento dos dispositivos executa-se automaticamente com o software NI-MAX da mesma fabricante dos módulos, tornando possível fazer a leitura dos sensores na programação do LabView com o auxílio dos blocos DAQ Assistant. Nesses blocos é possível configurar o tipo de sensor utilizado bem como a frequência de aquisição.

A programação responsável pelo funcionamento do sistema pode ser observada na Figura 17. No programa também está disponível um bloco de escrita de dados em arquivo externo, sendo suportado arquivos de planilha com extensão \*.xlsx. Esse bloco foi configurado para que a leitura da temperatura de cada ciclo fosse salva em uma nova planilha, comportando os dados de tempo e temperatura.

Figura 17 - Programação do LabView para sistema de aquisição de temperatura.

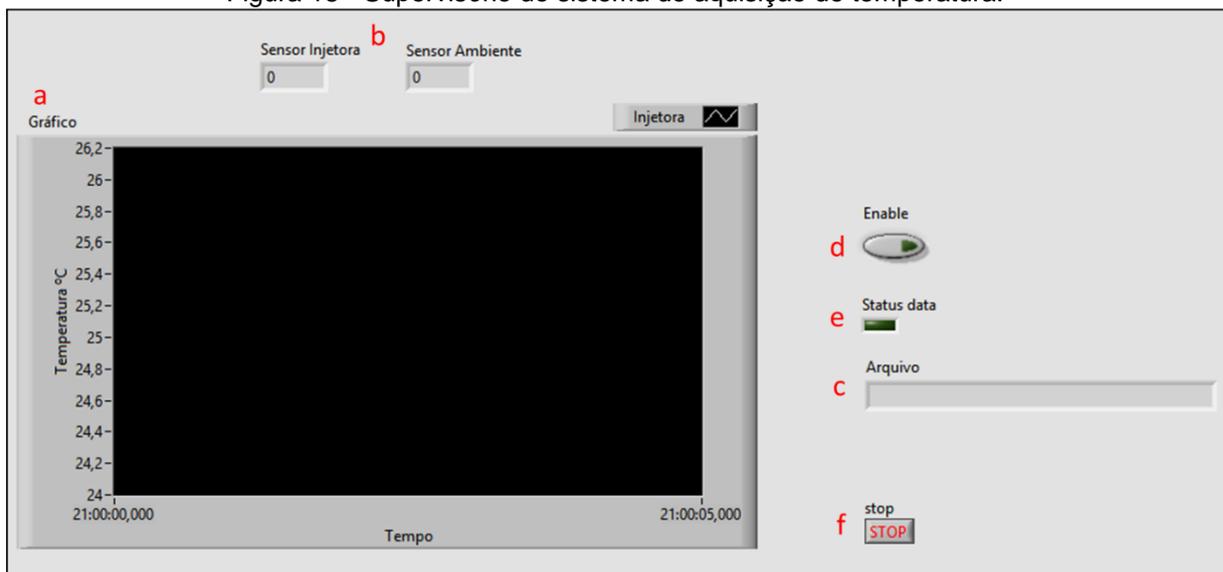


Fonte: Elaboração própria.

Também foram adicionados elementos para o controle da aquisição e visualização da leitura em tempo real:

- a) Gráfico gerado pelos dados da leitura da temperatura, para monitoramento do comportamento durante o processo;
- b) indicadores numéricos, para uma verificação mais direta do valor da temperatura em °C;
- c) campo com o diretório da planilha gerada, na qual os dados estão sendo armazenados;
- d) botão “enable” que habilita a escrita no arquivo, ou seja, define se os dados serão salvos ou se o processo será apenas de monitoramento do processo;
- e) indicador visual informa o usuário, de forma mais perceptível, se os dados estão sendo armazenado no arquivo externo;
- f) botão “stop” permite a interrupção e finalização do programa.

Figura 18 - Supervisório do sistema de aquisição de temperatura.



Fonte: Elaboração própria.

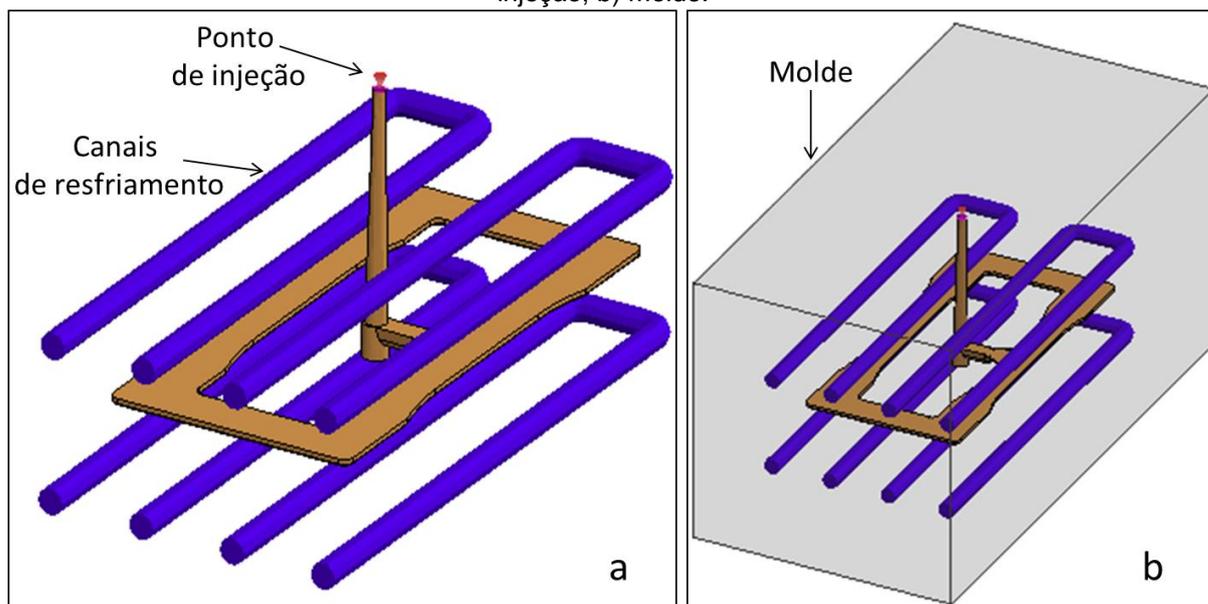
### 3.3 Simulação em SolidWorks *Plastics*

Para simular as condições de injeção de 1 a 9, empregou-se o software SolidWorks *Plastics*. Como o banco de dados do software não continha o *grade* utilizado nas injeções do corpo de prova, adotou-se o contratipo Ronfalin SFA34 da DSM *Engineering Plastics*, um ABS com índice de fluidez de 26g/10min igual ao ABS AF360, também contando com características térmicas semelhantes.

Os demais parâmetros foram ajustados com os mesmos valores utilizados para as peças moldadas por injeção. Visando aproximar as condições simuladas das práticas, modelaram-se os canais de resfriamento e um molde virtual, conforme as dimensões reais, dos mesmos. Também foi localizado o ponto de injeção na entrada do canal de alimentação, que já estava modelado em conjunto com a peça. Esses componentes virtuais estão representados na Figura 19.

Para a malha gerada para analisar a peça foi utilizado uma malha sólida com superfície triangular de 1,5mm, enquanto para a malha do molde as arestas triangulares foram de 8mm, já os canais de resfriamento foram divididos em 3 a cada secção. O ponto de injeção foi definido para englobar todos os elementos da entrada do canal de injeção.

Figura 19 – Componentes virtuais para auxiliar a simulação: a) canais de resfriamento e ponto de injeção; b) molde.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.3.1. Avaliação de Pressão e Temperatura

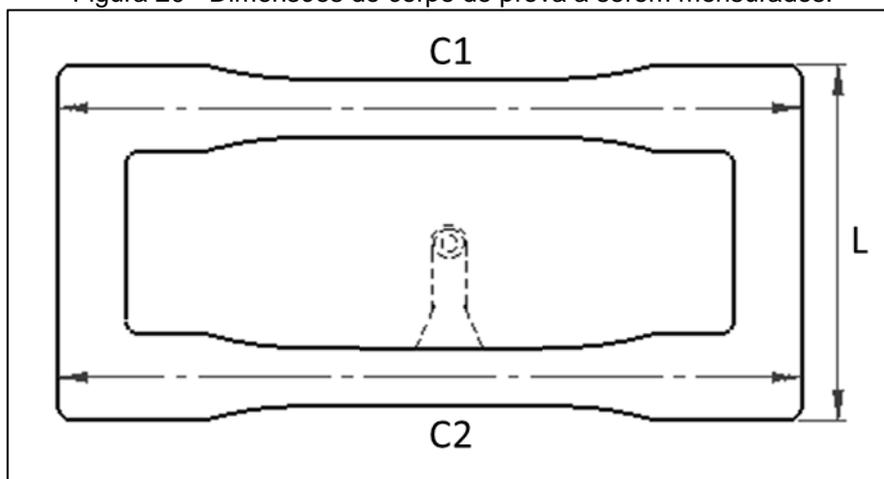
Para obter os dados de temperatura e pressão das simulações realizadas no SolidWorks *Plastics*, foi utilizado a funcionalidade de plotagem XY do software, no qual identificou-se os nós da malha a serem monitorados durante o processo e foi possível verificar o comportamento da temperatura e da pressão ao longo do preenchimento. Os nós escolhidos buscam representar os transdutores, dessa forma foram optados os nós com as localizações próximas às disponíveis no molde (Figura 13).

### 3.4. Determinação da Contração e Massa

Os corpos de prova tiveram suas dimensões obtidas por meio de uma máquina de medir por coordenadas modelo LKG80-C com controlador Renishaw UCC, como mostra a Figura 21. As peças injetadas tiveram seus canais removidos, porém não se separou os corpos de prova, para que também fosse possível medir a largura da peça. As outras dimensões obtidas foram o comprimento do corpo de prova sem linha de solda (da entrada), comprimento do corpo de prova com linha de

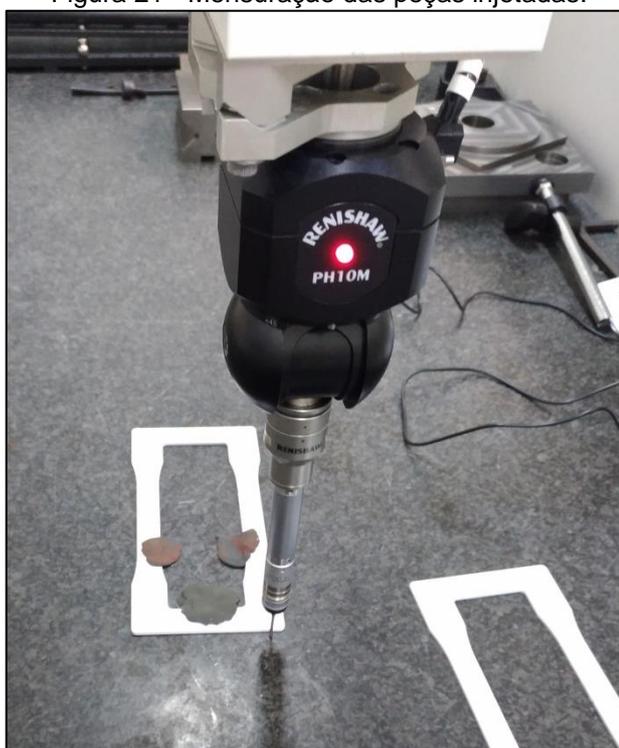
solda e a espessura, conforme mostra Figura 20. Para cada condição foram verificadas 3 peças, sendo que não foram verificadas as condições controladas pela pressão de comutação. Para as dimensões conferidas, a exatidão da máquina foi de 0,002 mm.

Figura 20 - Dimensões do corpo de prova a serem mensurados.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 - Mensuração das peças injetadas.



Fonte: Elaboração própria.

Por conta da dificuldade de medir a espessura na máquina de medir por coordenadas, esta característica foi medida utilizando um micrômetro digital Insize

com resolução de 0,001 mm. A espessura dos corpos gerados na etapa de variação de pressão de comutação também foi realizada desta forma.

A contração linear das peças foi obtida por meio da equação 1.

Para obter as massas das peças injetadas foi utilizada uma balança analítica (Figura 22) com resolução de 0,1 miligramas e exatidão de 1 miligrama. Foram utilizadas 5 amostras de cada condição sem a remoção dos canais, visto que objetivou-se uma comparação com os resultados do SWP. Posteriormente também foram mensurados sem os canais.

Figura 22 - Aferição da massa das peças moldadas por injeção.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.5. Ensaio de Tração

O ensaio de tração dos corpos de prova foi realizado no IFSC – Câmpus Caçador em uma máquina EMIC DL 2000. Para preparar os corpos para testes, além da remoção dos canais, separaram-se os corpos com linha de solda dos corpos da entrada. Com uma amostra de 6, foram avaliados apenas os corpos com linha de solda. Nos ensaios da segunda etapa todos os 5 corpos de cada condição foram verificados. Em todos os utilizou-se uma taxa de deformação de 5mm/min.

### **3.6. Análise dos dados**

Os dados obtidos durante os ensaios e mensurações foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA). Esse método estatístico permite observar se os fatores analisados exerceram alguma influência sobre as variáveis de resposta. Utilizou-se um intervalo de confiança de 95%, indicando que para uma probabilidade de significância abaixo de 0,05 a variável dependente foi estatisticamente influenciada pela variável de controle.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Defeitos Visuais

Logo após as injeções dos corpos de prova, verificaram-se algumas características visuais apresentadas nas peças. Para todas as condições analisadas, a linha de solda se apresentou de forma visível, mas não na condição de moldagem incompleta de modo a comprometer a aparência da peça, a Figura 23 mostra o aspecto real e o mesmo processado a fim de torná-lo mais visível para caráter demonstrativo.

Figura 23 - Linha de solda aparente.



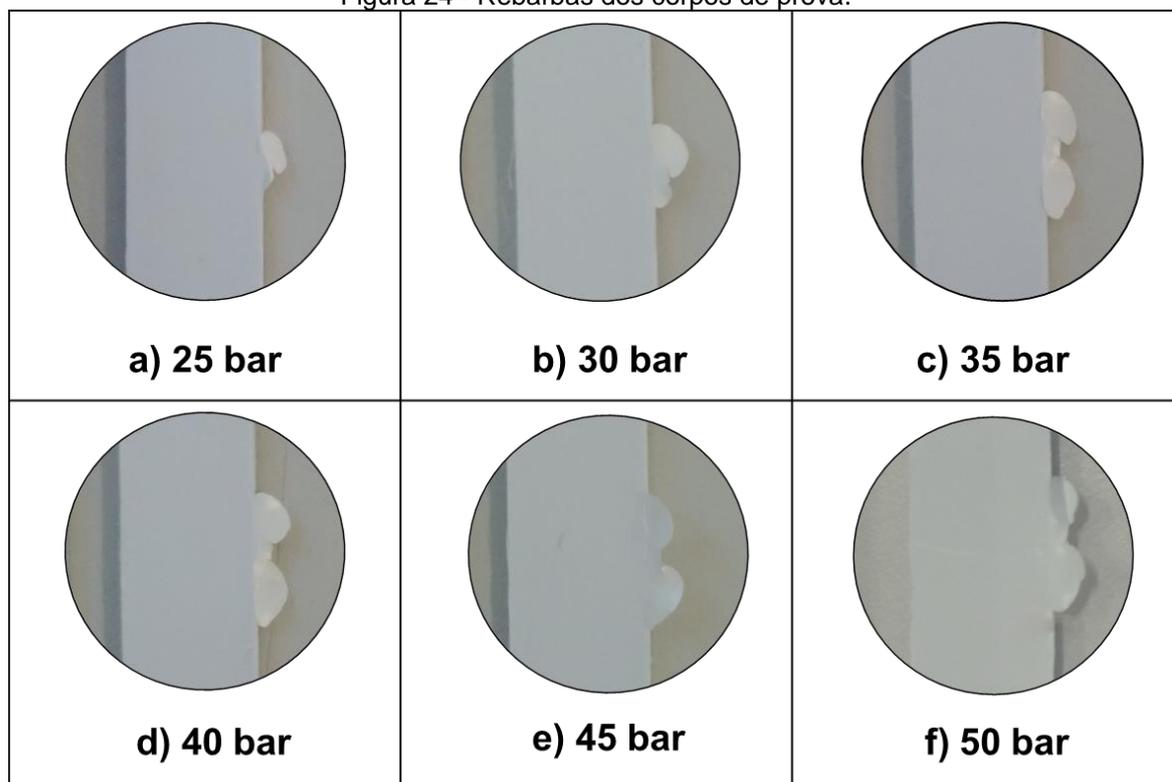
Fonte: Elaboração própria.

Outro perfil identificado foi a formação de rebarbas na segunda etapa de testes, quando houve variação da pressão de comutação na região da linha de

solda. Uma sequência da influência da pressão sobre o defeito pode ser visualizado na Figura 24. Nestes casos, as rebarbas também se formaram no canal de alimentação.

Durante a condição 5 (m50/i215) da primeira etapa, em que os parâmetros de temperatura do molde e temperatura de injeção foram iguais aos valores utilizados para esses ensaios, a pressão da região da linha de solda registrou um valor médio de 6 bar no momento da comutação e a peça não apresentou rebarbas. Partindo de uma premissa de que esse seria o valor mais próximo do ideal, ao utilizar valores superiores dispõe-se de uma condição de comutação atrasada, a qual tem tendência de gerar sobrepressão e, conseqüentemente, rebarbas.

Figura 24 - Rebarbas dos corpos de prova.



Fonte: Elaboração própria.

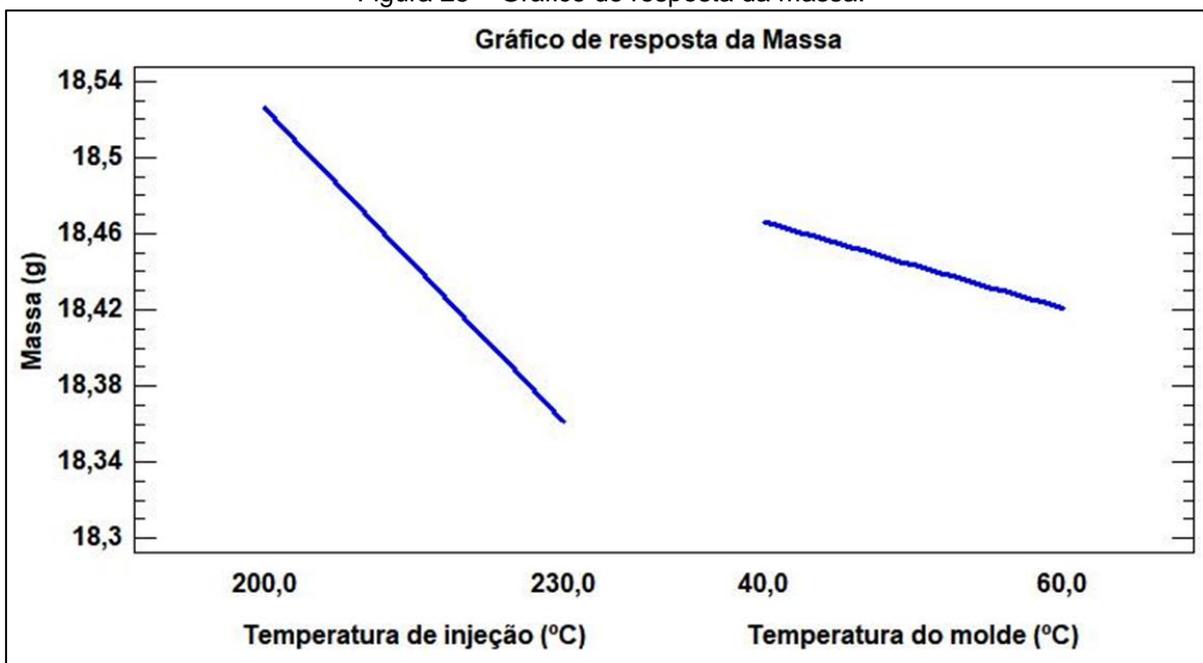
## 4.2. Massa

### 4.2.1. Análise de Variância

Para as condições de 1 a 9, os resultados da ANOVA da massa podem ser vistos no gráfico da Figura 25. Tanto a temperatura de injeção quanto a temperatura do molde foram estatisticamente significativas, com valores de nível de descritivo (P) de 0,0045 para  $T_M$  e menor que 0,0001 para  $T_I$ .

Além disso, percebe-se que a variação da temperatura de injeção causa uma maior variação na massa da peça comparada à temperatura do molde, embora ambos tenham uma influência negativa sobre a mesma, ou seja, o aumento das temperaturas ocasiona uma diminuição na massa.

Figura 25 – Gráfico de resposta da massa.



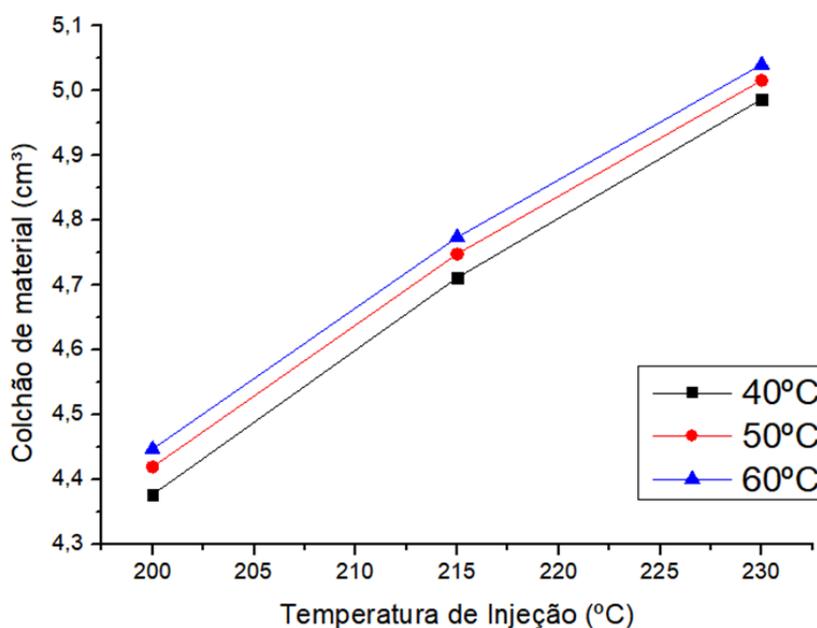
Fonte: Elaboração própria

Durante a etapa de injeção, a máquina injetora deve realizar o preenchimento do molde, assim, a pressão de injeção deve ser suficiente para essa preencher e pressurizar o molde até o ponto de comutação. Temperaturas do fundido mais baixas tornam o material mais viscoso e difícil de ser injetado, sendo necessário aplicar uma maior pressão de injeção para realizar essa etapa. Durante a etapa de recalque, ocorre maior compactação do material na cavidade e um volume

maior do fundido é injetado. Essa hipótese é confirmada pela quantidade de material restante no cilindro, a Figura 26 exibe o comportamento do colchão de massa pela temperatura de injeção.

Para acrescentar, o volume específico do material é menor para temperaturas mais baixas, possibilitando afirmar que mais massa do fundido irá entrar na cavidade, mesmo se fosse mantida uma quantidade de volume de colchão igual em todos os casos. Afetando dessa forma o peso final da peça.

Figura 26 - Gráfico de colchão de material pela temperatura de injeção.



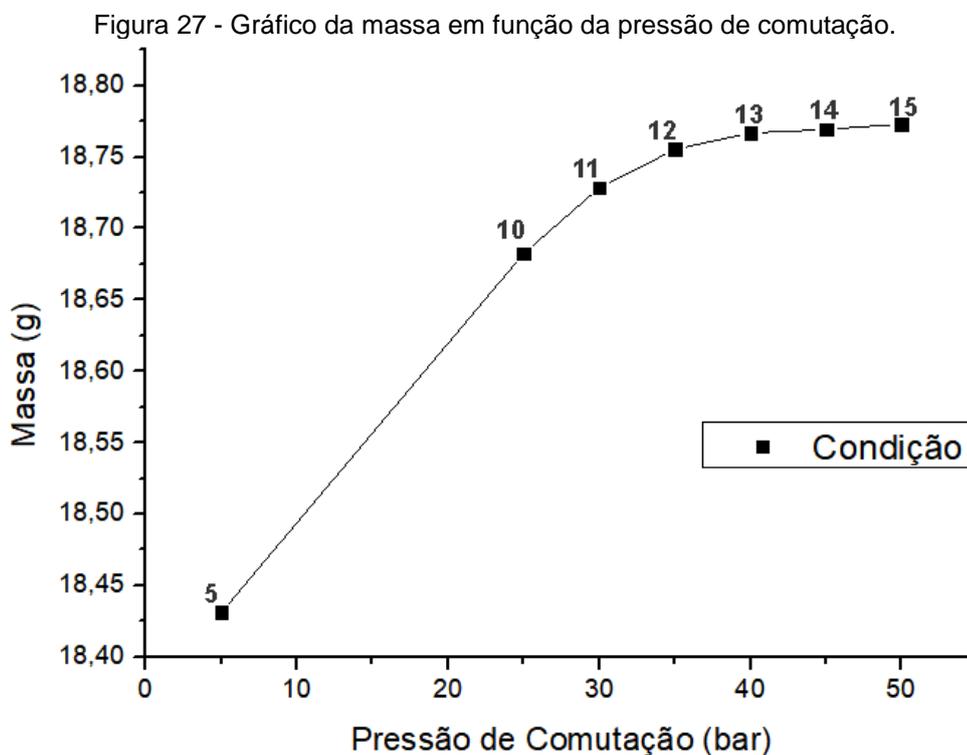
Fonte: Elaboração própria.

A temperatura do molde tem influência menor sobre a variação da pressão de injeção e ocorre, principalmente, devido à necessidade de superar pequenos aumentos da viscosidade causados pela formação camada solidificada do fundido na entrada da cavidade.

#### 4.2.2. Pressão de comutação

É possível observar que existe o aumento da massa conforme o aumento da pressão de comutação (Figura 27). Essa decorrência pode ser relacionada à pressão de injeção, uma vez que para atingir os valores crescentes de pressão de comutação na região de linha de solda, uma quantidade maior de material deveria

ser injetado. Como é possível observar na curva do gráfico existe a tendência da quantidade de massa da peça encontrar um valor de regime. Esse valor acontece devido à solidificação do canal de entrada, que limita a entrada de mais material na cavidade mesmo com o aumento da pressão.



Fonte: Elaboração própria.

### 4.3. Contração

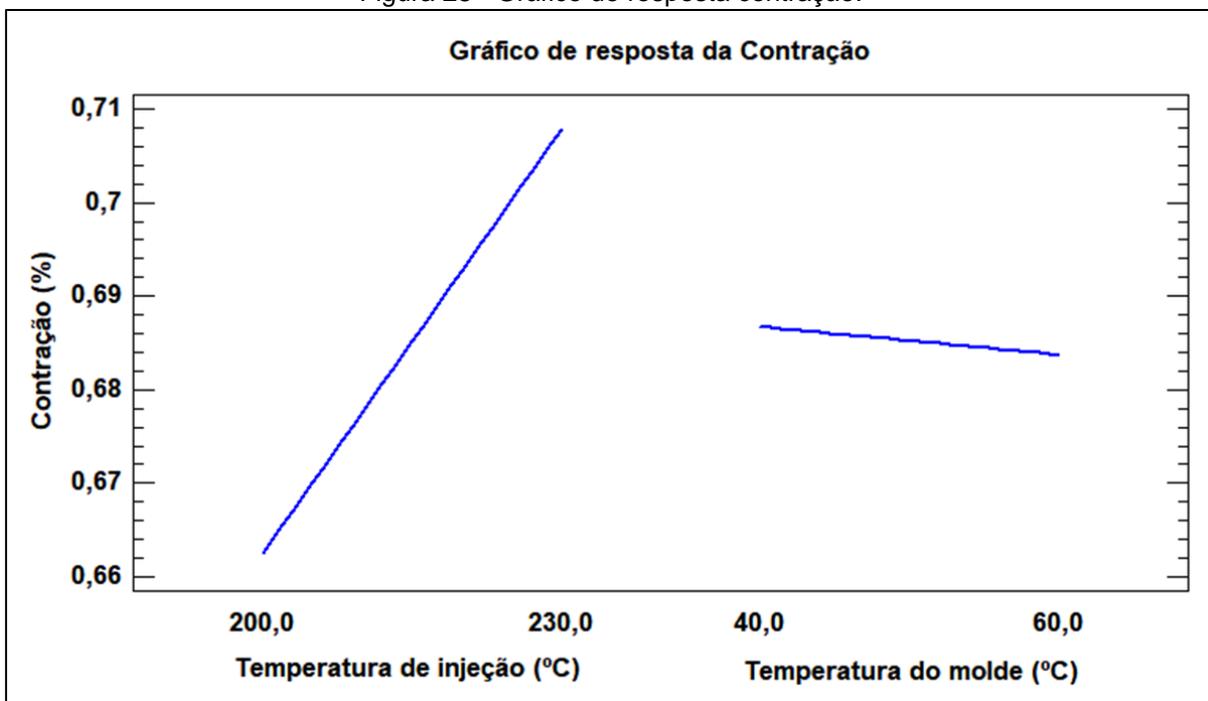
#### 4.3.1. Análise de variância

Com os valores obtidos pela máquina de medir por coordenadas, a análise de variância evidenciou um resultado para a contração conforme a Figura 28. Para essa propriedade, a temperatura do molde não foi um fator significativo, diferente da temperatura de injeção ( $P=0,0003$ ). A contração verificada é referente ao corpo de prova com linha de solda.

O comportamento crescente da contração proveniente do aumento da temperatura de injeção pode ser atribuído a duas fontes: a contração térmica que gera uma relação direta com a temperatura do fundido, ou seja, maior temperatura

de injeção maior a contração quando a peça atingir a temperatura ambiente; e também a orientação molecular.

Figura 28 - Gráfico de resposta contração.



Fonte: Elaboração própria.

A temperatura do molde, apesar de não demonstrar significância para a contração, apresentou uma disposição contrária para a mesma. Essa reação faz parte da expansão térmica da cavidade do molde que acaba compensando parte da contração térmica do material. A temperatura mencionada, ainda, tem um efeito oposto sobre a orientação molecular do material, de modo a influenciar a contração devido a essa propriedade.

Apesar da variação da temperatura, a contração se manteve dentro da faixa de valores fornecidos pela folha de dados do material para as temperaturas de processamento recomendadas. Em outras palavras, trabalhar com os parâmetros propostos pelo fornecedor irá garantir um comportamento de contração de acordo com o esperado. Assim, pode-se ajustar as dimensões da peça variando  $T_M$  e a  $T_I$  para permitir, por exemplo, a montagem entre componentes.

### 4.3.2. Comparação entre corpos de prova

O estudo da contração pode ser estendido em uma comparação entre a contração do comprimento de cada corpo de prova. Os valores encontrados para o corpo de prova da entrada e do corpo de prova com linha de solda seguem na Tabela 5.

Tabela 5 - Contração nos corpos de prova.

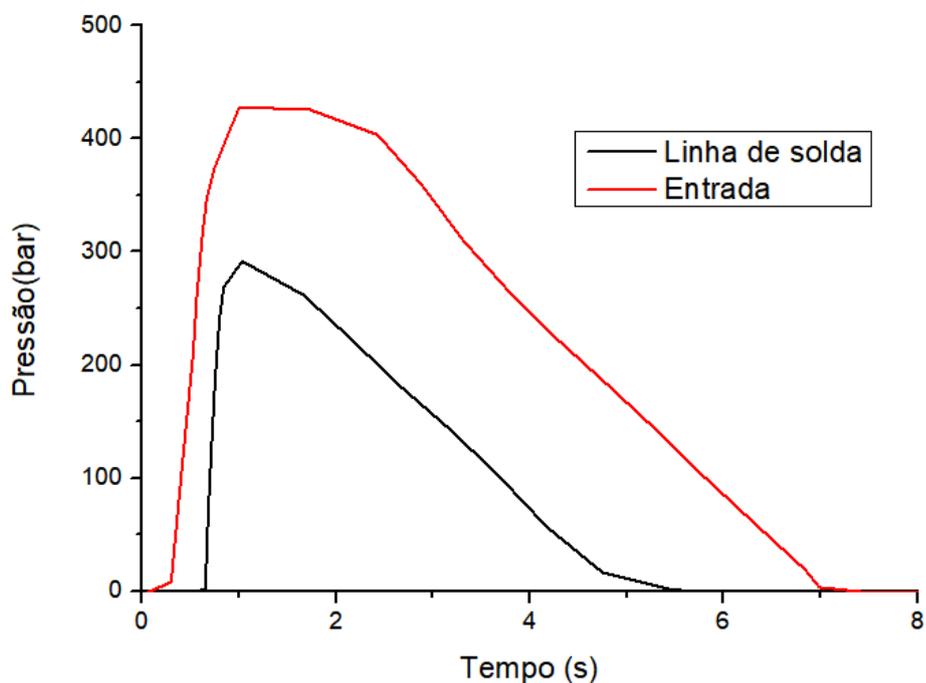
Condição	Corpo da Entrada (%)		Corpo com Linha de Solda (%)	
	Contração	Desv. Pad	Contração	Desv. Pad
1	0,590	0,004	0,658	0,003
2	0,648	0,002	0,699	0,001
3	0,671	0,002	0,708	0,001
4	0,599	0,002	0,658	0,001
5	0,645	0,002	0,688	0,003
6	0,668	0,002	0,700	0,001
7	0,611	0,001	0,661	0,003
8	0,653	0,002	0,690	0,002
9	0,676	0,004	0,705	0,002

Fonte: Elaboração própria.

Com a análise do desvio padrão, é possível afirmar que os corpos de prova da entrada apresentaram uma contração inferior aos corpos com linha de solda. No entanto, os valores já eram esperados, uma vez que o corpo de prova da entrada é submetido a uma pressão superior ao longo do ciclo, permitindo uma melhor estabilização da forma.

Como o corpo de prova com linha de solda se localiza mais longe da entrada, a pressão sobre o mesmo é menor por conta da queda de pressão na cavidade. A instrumentação do molde permitiu verificar essa queda em todas as condições estudadas, a Figura 29 exhibe a diferença da pressão na cavidade dos dois corpos de prova na condição 5 (m50/ i215).

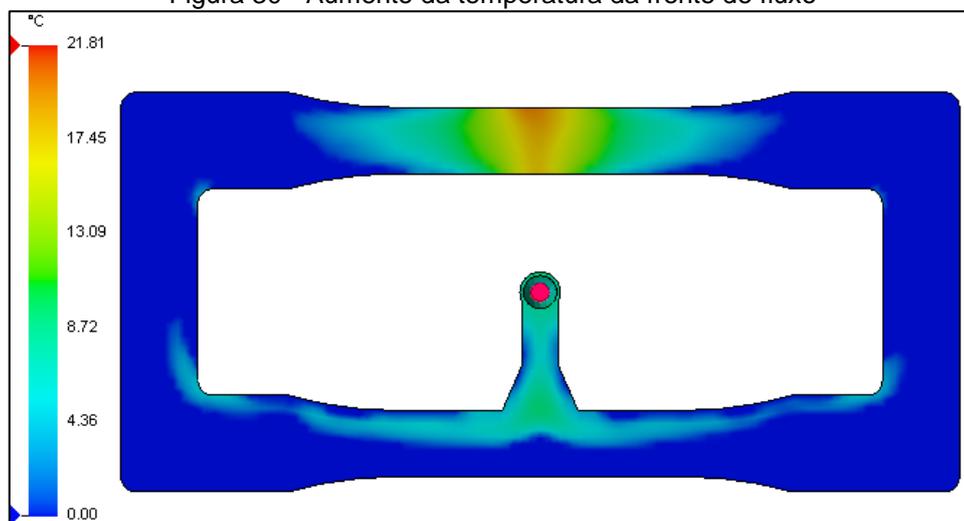
Figura 29 - Gráfico da pressão na cavidade dos corpos de prova.



Fonte: Elaboração própria.

Outro fator responsável pelas contrações diferenciadas, porém em menor proporção, é o aumento da temperatura da frente de fluxo, que contribui para a contração térmica do corpo de prova, pois o mesmo terá uma temperatura maior se comparado ao corpo de prova da entrada. Essa característica pode ser observada por meio do resultado gerado pelo SolidWorks *Plastics* na Figura 30.

Figura 30 - Aumento da temperatura da frente de fluxo



Fonte: Elaboração própria.

### 4.3.3 Espessura

O levantamento dos valores da espessura derivados da leitura com o micrômetro foi realizada com objetivo de comparar os tipos de ensaios. A Tabela 6 traz a contração referente à dimensão mencionada. É possível verificar que os valores relacionados às condições com variação na pressão de comutação geraram uma contração negativa, ou seja, a espessura das peças foi superior à dimensão nominal da cavidade do molde.

Tabela 6 - Contração na espessura dos corpos de prova.

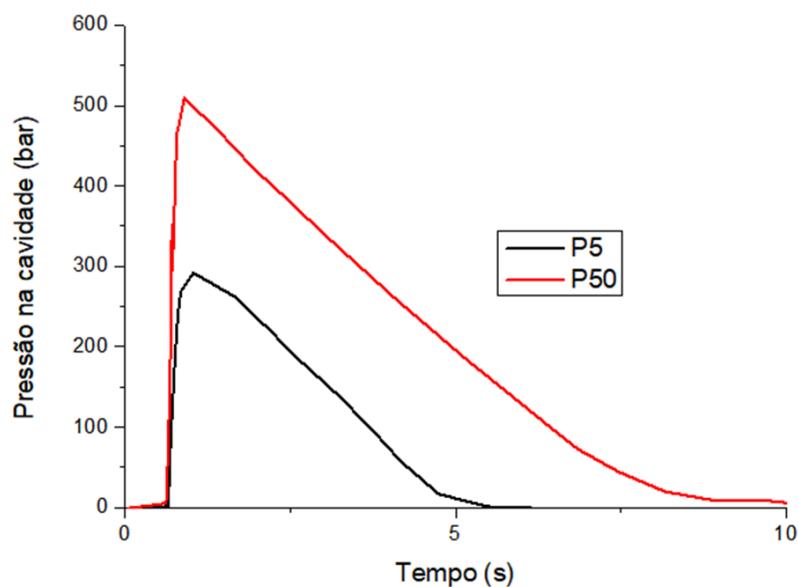
Condição	Contração (%)	Desvio Padrão
1	0,317	0,058
2	0,633	0,076
3	1,083	0,076
4	0,533	0,029
5	0,917	0,029
6	1,200	0,050
7	0,567	0,029
8	1,000	0,000
9	1,317	0,029
10	-0,117	0,126
11	-0,317	0,029
12	-0,500	0,087
13	-0,450	0,050
14	-0,517	0,029
15	-0,583	0,058

Fonte: Elaboração própria.

Como há uma comutação atrasada que gera uma sobrepressão (Figura 31), pode ter causado um leve afastamento das placas do molde, possibilitando a fabricação de peças mais espessas que a dimensão nominal, uma vez que ocorreu em todas as condições da etapa de controle de comutação por pressão na cavidade.

Diferentemente dos valores de contração para o comprimento dos corpos de prova, a contração da espessura não ficou dentro da faixa estipulada pelo fornecedor. As causas dos índices superiores estão relacionados, além da mudança de instrumento de medição, à localização do ponto de medição, em que a região verificada pode ter sido afetada por rechupes.

Figura 31 - Sobrepressão (P50) e Pressão ideal (P5).

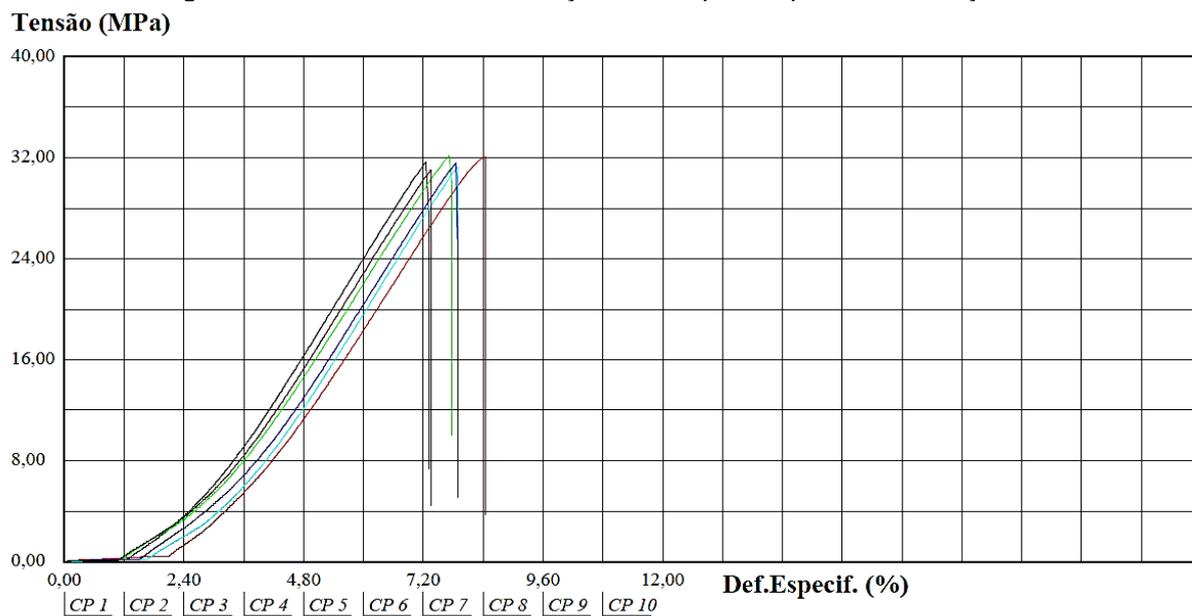


Fonte: Elaboração própria.

#### 4.4. Ensaio de tração

Todos os corpos testados manifestaram um comportamento semelhante ao de materiais frágeis, podendo ser identificado na curva tensão-deformação gerada nos ensaios de tração, como mostra a Figura 32 com curvas referentes à condição 4.

Figura 32 - Curva tensão-deformação dos corpos de prova da condição 4.



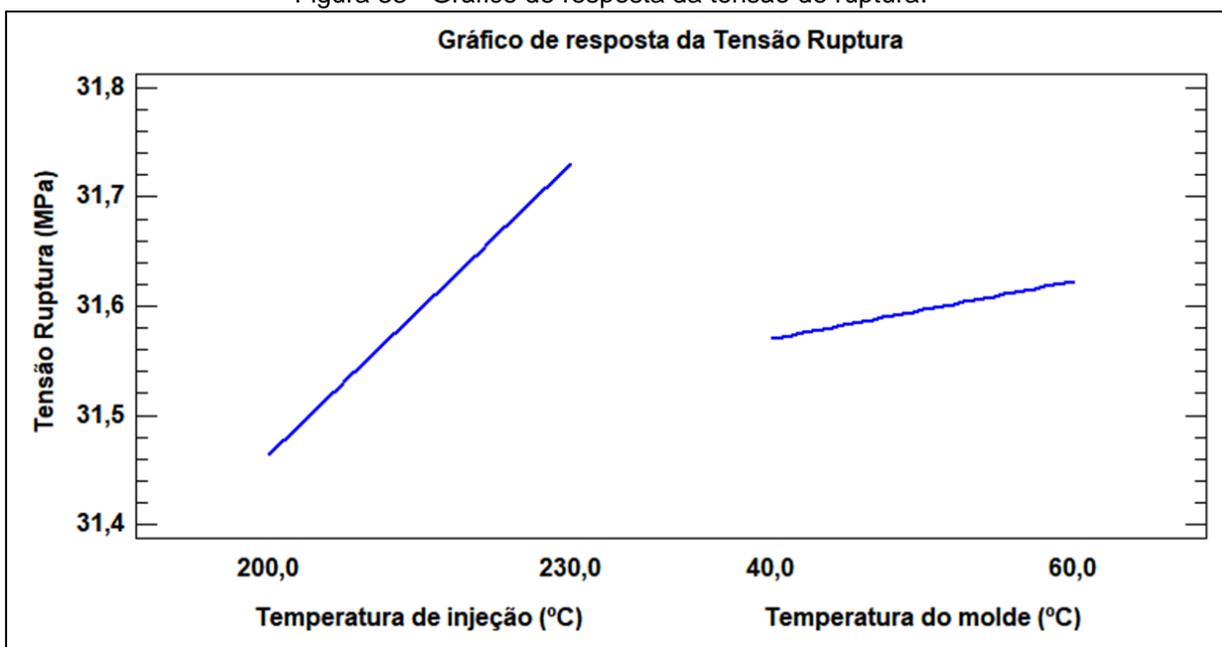
Fonte: Elaboração própria.

O comportamento dos corpos com linha de solda foi bem semelhante para a resistência à tração, atribui-se essa conduta ao fato de se ter mantido a proporção de 60% da pressão de injeção para a pressão de recalque para todas as condições. Assim, pode-se afirmar que o parâmetro influencia a resistência da linha de solda, sustentando os resultados dos estudos de Liu, Wu e Chang (2000), Zhou e Mallick (2005) e Wu e Liang (2005).

#### 4.4.1. Tensão de ruptura

A resposta da tensão de ruptura para as variáveis de controle está representada na Figura 33.

Figura 33 - Gráfico de resposta da tensão de ruptura.



Fonte: Elaboração própria.

A análise de variância identificou que não houve significância entre as variáveis. Contudo, percebe-se que as temperaturas de injeção e do molde têm uma predisposição a aumentar a resistência à tração do material, aumentando a tensão de ruptura no corpo com linha de solda.

A orientação molecular no sentido do fluxo tem grande influência na resistência à tração no mesmo sentido, sendo que quanto mais orientado está o material, melhor será a resistência à tração. A orientação molecular, por sua vez, é

menor com o aumento da temperatura do fundido e do molde. Portanto, esperava-se que a tensão de ruptura diminuísse com o aumento das variáveis.

Como se observa o efeito oposto como tendência na resposta, pode-se afirmar que para essas condições, a linha de solda é o fator limitante da resistência à tração e o efeito da  $T_I$  e  $T_M$  sobre este defeito atua de forma a minimizá-lo, ou seja, o aumento das temperaturas tende a propiciar uma melhor junção das frentes de fluxo que melhora a resistência da linha de solda, concordando com Chen et al. (2007).

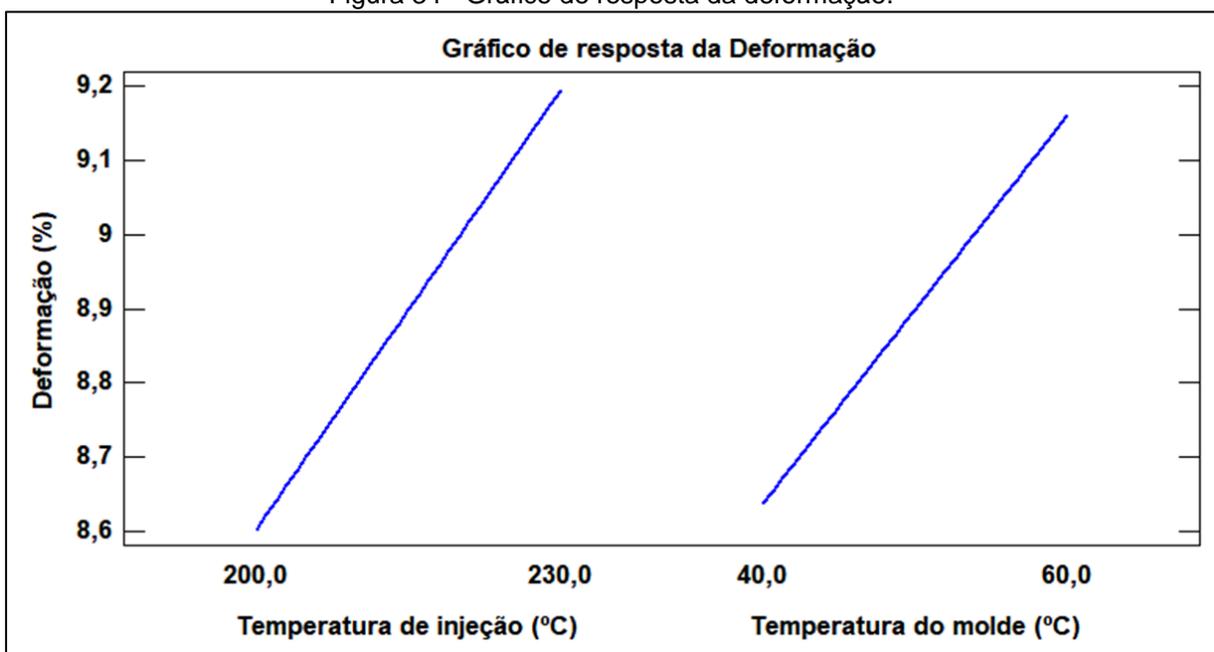
Segundo Malloy (1994), estudos indicam que a temperatura de injeção é a variável de processo mais influente no defeito de linha de solda para materiais amorfos, enquanto a temperatura do molde é menos significativa, uma vez que mesmo com as maiores temperaturas utilizadas, os valores ainda são inferiores à temperatura de transição vítrea do material.

#### **4.4.2. Deformação na ruptura**

A deformação de ruptura do corpo de prova com linha de solda obtida nos ensaios de tração não foi afetada de forma significativa, segundo a análise de variância. Porém, observa-se (Figura 34) uma tendência de que o corpo se deforme mais, antes de se romper conforme o aumento da temperatura de injeção e do molde durante seu processamento.

Sabendo que a linha de solda influi uma situação mais crítica ao corpo de prova, se o corpo ainda está na sua região elástica quando comparado a um corpo sem linha de solda, é admissível reconhecer que o aumento da tensão de ruptura também causará um aumento na deformação de ruptura. Logo, explica-se o aumento da deformação nos parâmetros verificados.

Figura 34 - Gráfico de resposta da deformação.



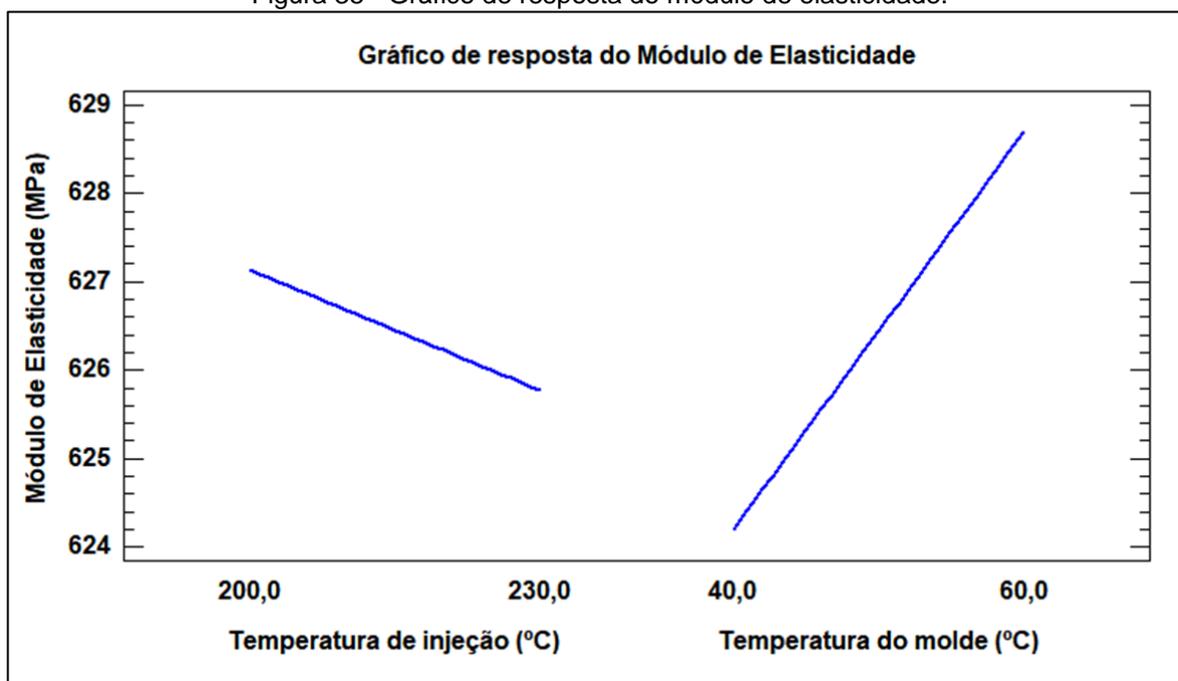
Fonte: Elaboração própria.

#### 4.4.3. Módulo de Elasticidade

Para os valores do módulo de elasticidade encontrados (Figura 35), as temperaturas analisadas não obtiveram resultados com significância estatística. Entretanto, apresentaram tendências de comportamento contrárias. Enquanto a variação da temperatura molde gerou uma relação positiva com o módulo de elasticidade, a temperatura de injeção teve o efeito oposto, causando a diminuição do módulo.

Como o módulo de elasticidade depende da região elástica do material, sua interpretação pode ser dada como o “peso” das variáveis de controle sobre as variáveis de resposta que a definem (tensão e deformação). Dessa maneira, alterar a temperatura de injeção tende a causar maior variação na deformação do corpo de prova do que na variação da tensão de ruptura, visto que ambas fornecem uma relação positiva entre si.

Figura 35 - Gráfico de resposta do módulo de elasticidade.



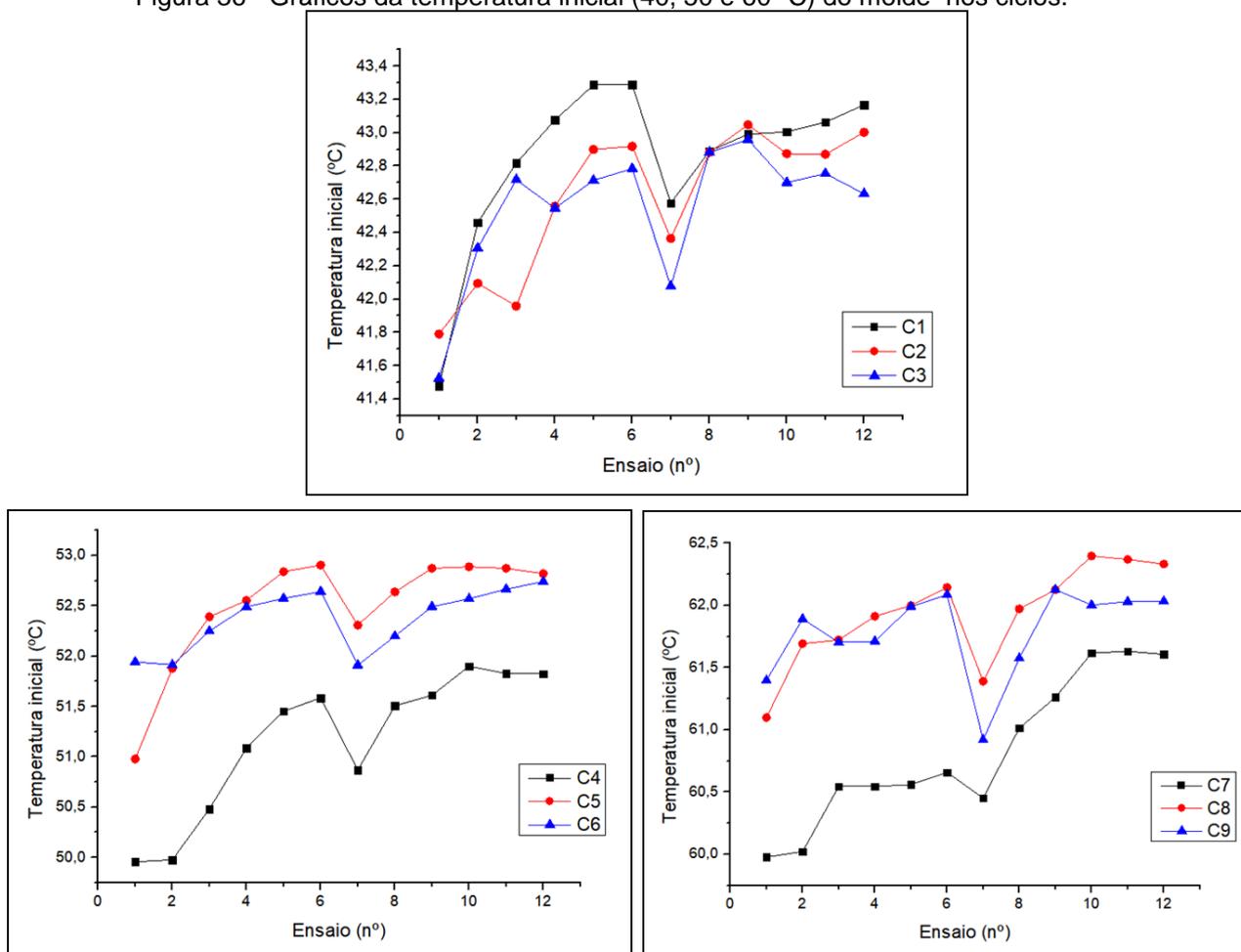
Fonte: Elaboração própria.

#### 4.5. Temperatura do molde

Os valores obtidos pelo termopar do molde forneceram monitoramento da temperatura do molde e não do material fundido. Com a análise das temperaturas dos ensaios, verificou-se que apesar da temperatura do molde ter sido regulada para valores arredondados de 40, 50 e 60 °C, a cada início de ciclo a temperatura aumentava, até se estabilizar em um valor superior.

Com os dados da temperatura inicial de cada ciclo dos testes foi gerado o gráfico da Figura 36. É possível perceber esse comportamento, com a ressalva que a queda da temperatura inicial do molde nas peças 7 de cada condição, está ligada ao momento em que o molde ficava aberto para a troca da aquisição do transdutor de pressão.

Figura 36 - Gráficos da temperatura inicial (40, 50 e 60 °C) do molde nos ciclos.



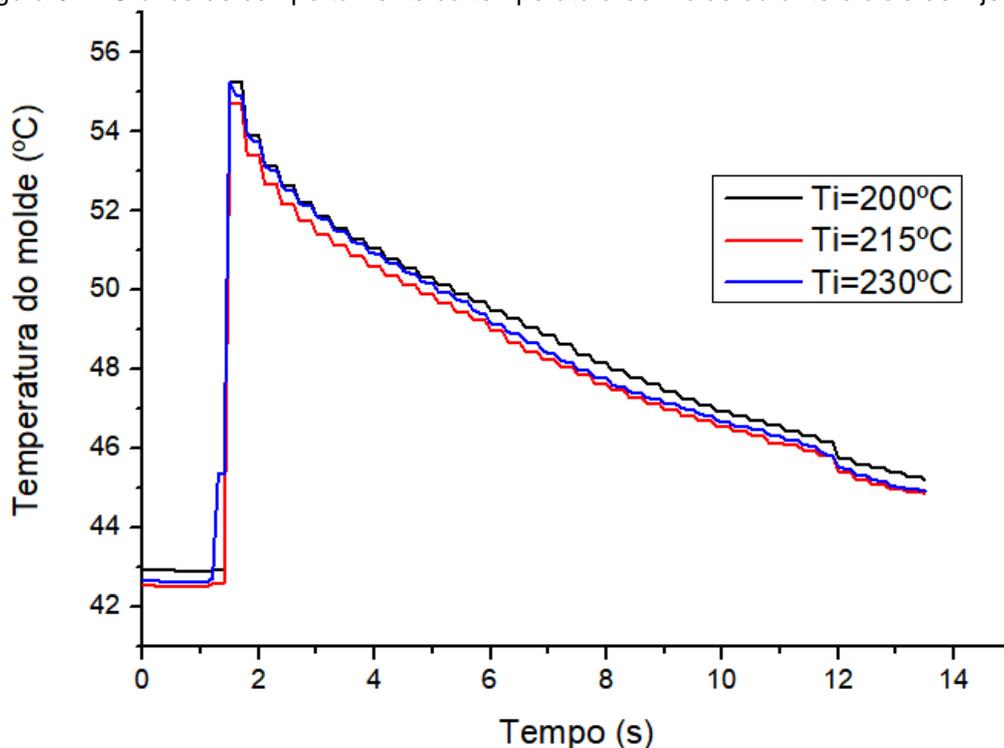
Fonte: Elaboração própria.

Embora existam flutuações causadas pelas pausas entre os ciclos para a extração da peça, é possível afirmar que se a injetora estivesse trabalhando em ciclo de produção, a temperatura do molde tenderia a se estabilizar em um valor superior ao programado. Sendo assim, caso fosse necessário um controle mais preciso da temperatura do molde, seria necessário programar a temperatura em um valor mais baixo, já antevendo que o aquecimento do molde antes da estabilização da temperatura. Entretanto, não foi possível definir qual seria a compensação desse valor, necessitando-se mais estudos para identificar o equilíbrio dessa temperatura.

Com a leitura do termopar, também se pode verificar a variação da temperatura do molde durante o tempo do ciclo de injeção para cada temperatura de injeção utilizada. O gráfico da Figura 37 mostra esse comportamento para a temperatura do molde de 40 °C. Em que se percebeu uma conduta semelhante para as 3 temperaturas observadas.

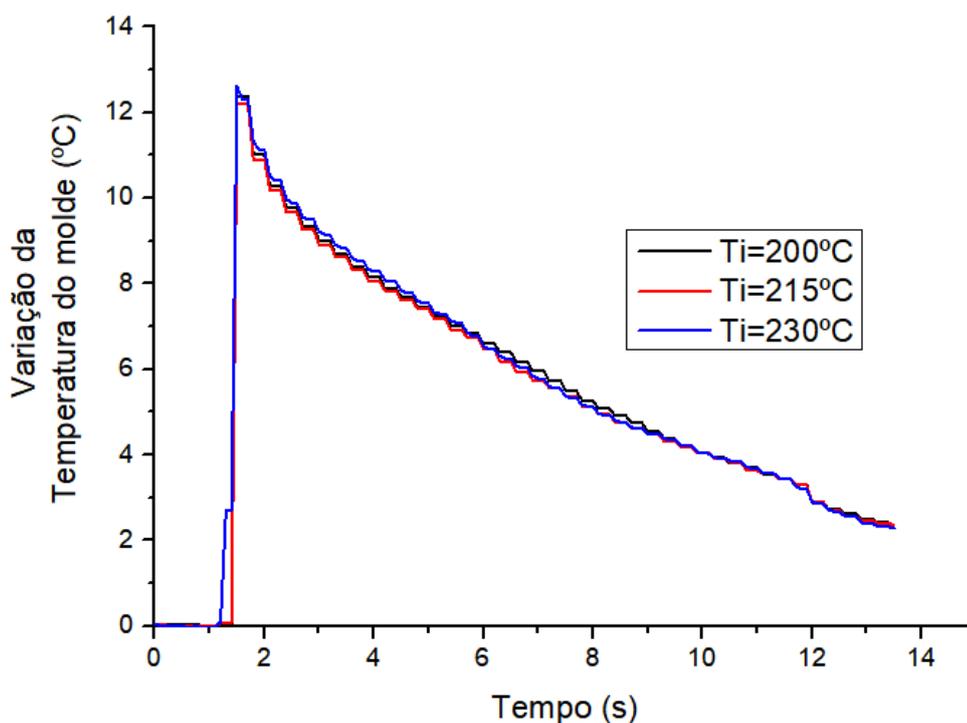
A sobreposição dessas curvas, juntamente com deslocamento para a origem do gráfico, possibilitou averiguar que a variação da temperatura do molde (Figura 38) foi aproximadamente 12,5 °C para os 3 casos.

Figura 37 - Gráfico de comportamento da temperatura do molde durante o ciclo de injeção.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 38 - Gráfico da variação da temperatura do molde durante o ciclo de injeção



Fonte: Elaboração própria.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a influência da temperatura de injeção, temperatura do molde e pressão de comutação sobre a massa, contração, propriedades mecânicas e formação de linhas de solda em um corpo de prova de ABS.

Nenhum dos parâmetros variados foi estatisticamente significativo para as propriedades mecânicas dos corpos de prova com linha de solda submetidos a ensaios de tração. Porém, apresentaram tendências de variações condizentes com o visto na literatura. A consistência dos valores de tensão de ruptura, deformação de ruptura e módulo de elasticidade, foi atribuída ao padrão uniforme de perfil de recalque utilizado.

Para a massa, ambas as temperaturas afetaram de forma significativa e negativa, em que o aumento dos fatores causou a diminuição da massa. Já a pressão de comutação alterou a variável de forma crescente até um valor de regime máximo.

A contração do corpo de prova com linha de solda teve apenas a temperatura de injeção como fator significativo, a mesma gerou uma relação positiva com a resposta. Mas, na comparação entre os corpos de prova sem e com linha de solda, a contração diferenciou-se principalmente pela queda de pressão na cavidade, esse indício foi consolidado com a análise das leituras fornecidas pelos transdutores do molde. A contração na espessura da peça apresentou um comportamento particular para as peças injetadas por controle de comutação por pressão na cavidade, em que foram superiores ao valor nominal, essa característica é consequência de comutações atrasadas e, conseqüentemente, sobrepessão.

Com o funcionamento adequado do sistema de aquisição de temperatura, verificou-se um aquecimento do molde durante os ciclos de injeção, com uma tendência a se estabilizar em um valor superior ao preestabelecido.

## 6. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A próxima etapa ideal para completar esse estudo seria realizar ensaios de tração dos corpos de prova sem linha de solda injetados, a fim de comparar as propriedades dos corpos de prova entre si e definir o fator linha de solda.

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

- a) Análise mais minuciosa acerca do comportamento da temperatura durante a moldagem por injeção, estudando-se sobre características como transferência de calor, temperatura de estabilização, taxa de resfriamento, entre outros;
- b) alterar outros parâmetros de processo, tais como: pressão de recalque, velocidade de injeção e tempo de recalque;
- c) utilizar diferentes materiais poliméricos semicristalinos, para avaliar principalmente as propriedades físicas, tendo em vista que a fase cristalina do material sofre influências variadas.

## REFERÊNCIAS

- Abiplast. **Perfil 2016**: Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico. 2016.
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). **ASTM D638 - 02a**: Standard test method for tensile properties of Plastics. 2002.
- A Plus Plastics. **What is injection moulding**. Disponível em: <<http://aplusplastics.com.au/about/what-is-injection-moulding.aspx>>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- Apostila: Caracterização do processo de moldagem por injeção**. 2008.
- Arburg. **Apostila de Tecnologia de processo 1**. 2010.
- BECKER, L. **Estudo da instrumentação de moldes para aquisição da temperatura e pressão no processo de injeção de**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Tupy, Joinville.
- BIANCHEZZI, V. **Influência dos parâmetros de injeção na tensão residual e sua consequência no comportamento mecânico de componentes termoplásticos**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BIRLEY, Arthur; BATCHELOR, Jim; HAWORTH, Barry. **Physics of Plastics: Processing, Properties and Materials Engineering**. Munich: Hanser Gardner, 1991.
- CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 3ª. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- GERD, Pötsch; MICHAELI, Walter. **Injection molding**: an introduction. New York: Hanser, 1995.
- GORDON JR, M Joseph. **Total Quality Process Control for Injection Molding**. 2ª. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- HARADA, Júlio; UEKI, Marcelo Massayoshi. **Injeção de termoplásticos**: produtividade com qualidade. São Paulo: Artliber Editora, 2012.
- HARADA, Júlio. **Moldes para injeção de termoplásticos**: projetos e princípios. São Paulo: Artliber Editora, 2004.
- HUANG, Ming-Shyan. Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding. **Journal of Materials Processing Technology** .v.183, 2007. p. 419-424.
- LIU, S. J.; WU, J. Y.; CHANG, J. H. An experimental matrix design to optimize the weldline strength in injection molded parts. **Polymer Engineering & Science**, v. 40, 2000, p. 1256–1262.

MALLOY, Robert A. **Plastic part design for injection molding**: an introduction. New York: Hanser, 1994.

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

MIRANDA, Diego Alves de et al. Simulação computacional da injeção de termoplásticos: comparação de ferramentas CAE. **ABCM**, 2017.

Mundo do Plástico. **Resinas do futuro**: Oportunidades e tendências para a indústria do plástico. 2016.

OLIVEIRA, A. V. de. **Desenvolvimento de molde instrumentado para avaliação de linhas de solda**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis.

OLIVEIRA, A. V. de. et al. Influência dos parâmetros de processamento na resistência à tração de corpos de prova injetados de polipropileno com e sem linhas de solda. **Anais do 14º Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2017.

PFEIFER, D. C. **Estudo de propriedades mecânicas e caracterização da região de linha de solda de um biopolímero injetado em molde metálico e molde de fabricação rápida (VRE)**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SIMIELLI, Edson Roberto; SANTOS, Paulo Aparecido dos. **Plásticos de Engenharia**: principais tipos e sua moldagem por injeção. São Paulo: , 2010.

WU, Cheng-Hsien; LIANG, Wan-Jung. Effects of Geometry and Injection-Molding Parameters on Weld-Line Strength. **Polymer Engineering and Science**. v. 45, 2005. p. 1021-1030.

ZHOU, Yuanxin; MALLICK, P. K. Effects of melt temperature and hold pressure on the tensile and fatigue properties of an injection molded talc-filled polypropylene. **Polymer Engineering & Science**, v. 45, 2005. p. 755–763.