



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



Programa de Pós-Graduação em

Mecatrônica

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

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM MECATRÔNICA

**Desenvolvimento de molde instrumentado para avaliação de linhas de solda
em componentes plásticos**

MESTRANDO: Antonio Vinicius de Oliveira

CURSO: Mestrado Profissional em Engenharia Mecatrônica

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Sistemas Mecatrônicos

LINHA DE PESQUISA: Máquinas Automáticas Especiais

ORIENTADOR: Prof. Dr. Aurélio da Costa Sabino Netto

Florianópolis - SC

SETEMBRO / 2017.

CDD 671.52
O482d

Oliveira, Antonio Vinicius de
Desenvolvimento de molde instrumentado para avaliação de linhas de solda em componentes plásticos [DIS] / Antonio Vinicius de Oliveira; orientação de Aurélio da Costa Sabino Netto – Florianópolis, 2017.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Moldagem por injeção. 2. Linha de solda. 3. Massa. 4. Polipropileno. 5. Produtos plásticos. I. Sabino Netto, Aurélio da Costa. II. Título.

**Desenvolvimento de molde instrumentado para avaliação de linhas de solda
em componentes plásticos**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do grau de mestre ao programa de
pós-graduação em Mecatrônica do Instituto
Federal de Santa Catarina.

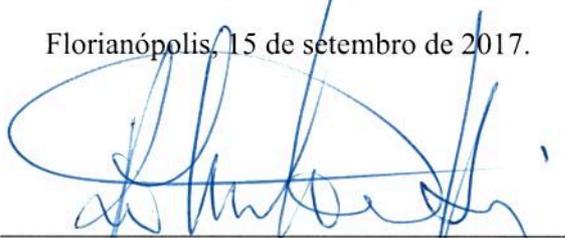
Orientador: Prof. Dr. Aurélio da Costa
Sabino Netto

Florianópolis - SC
SETEMBRO / 2017

**Desenvolvimento de molde instrumentado para avaliação de linhas de solda
em componentes plásticos**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Mecatrônica”
e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica.

Florianópolis, 15 de setembro de 2017.



Prof. Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng.
Coordenador do curso

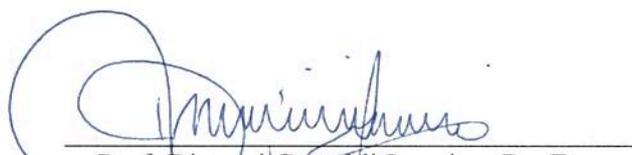


Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.
Orientador

Banca Examinadora:



Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.
Presidente



Prof. Diovani Castoldi Lencina, Dr. Eng.



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Aurélio da C. Sabino Netto, pelo apoio e pela orientação no desenvolvimento deste estudo, pelas sugestões, mediações e dedicação ao longo do trabalho, fatores que ajudaram a tornar esta pesquisa possível;

Ao Prof. Dr. Diovani C. Lencina que sempre me apoiou e não mediu esforços para auxiliar com a usinagem do molde;

Ao Prof. Dr. André R. Souza, pelo apoio no início dos trabalhos, auxiliando com informações e indicação de referencial bibliográfico relativo ao estudo proposto;

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Segalin de Andrade, pelo apoio no início dos trabalhos, auxiliando na construção e recolhimento dos dados para realização desta dissertação;

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus de Florianópolis, através do Mestrado em Engenharia Mecatrônica, pela disponibilidade dos equipamentos e infraestrutura para realização dos experimentos;

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus de Caçador, através do Prof. Dr. Rodrigo A. Paggi, pela disponibilidade dos equipamentos e infraestrutura para realização dos testes de tração nos corpos de prova; Ao grupo MDL-Brasil, pela doação de um portamolde padronizado;

À K&L Laboratório de Metrologia, através do proprietário Sergio Luiz Lenzi, pela disponibilidade dos instrumentos técnicos, equipamentos e infraestrutura de metrologia para a realização dos testes de massa;

À Kistler Brasil, através do Sr. Wilian Roberto Vieira (Gerente de vendas Brasil) e Sr. Claudio Eduardo Francisco (Suporte técnico Brasil), pela presteza e informações fornecidas;

Ao CNPq, pelo patrocínio financeiro para a compra dos sensores, cabos e outros itens necessários para a realização dos experimentos;

Aos meus familiares, Antonio Manoel de Oliveira (Pai - *in memoriam*), Herculana Hernacki de Oliveira (Mãe), Ana Cristina Exterkoetter (Esposa), Bianca Victória L. de Oliveira (Filha) e André Luis de Oliveira (Irmão), pelo apoio motivacional e compreensão da ausência durante a realização desta pesquisa.

A produção de bens de consumo, utilizando plásticos, vem aumentando significativamente pelo mundo. Para haver uma sintonia na automação em relação aos moldes, o controle de qualidade segue aprimorando os parâmetros, exigindo melhores índices. O monitoramento dos parâmetros com sensores na cavidade do molde procede crescendo gradativamente na Europa e EUA, e encontra barreiras dentro do Brasil devido ao alto custo. Este trabalho aborda o desenvolvimento de um molde instrumentado para avaliação de linhas de solda em componentes plásticos. Projetou-se um molde baseado em uma geometria que permite a formação de corpos de prova de tração com e sem a presença de linha de solda. O molde foi instrumentado com sensores de pressão e temperatura nas regiões da entrada e formação da linha de solda. Para a avaliação do molde foi realizado a injeção de peças em PP (Braskem H503) segundo um planejamento fatorial completo 4^2 com a variação dos seguintes fatores: vazão de injeção (20 e 40 cm^3/s); pressão de recalque (40 e 60%); tempo de recalque (3 e 5 s) e localização (entrada e linha de solda). As condições experimentais foram simuladas no software SolidWorks Plastics para comparação das curvas de pressão. A qualidade dos corpos de provas foi avaliada pela medição da massa e propriedades mecânicas obtidas através de ensaios de tração. As curvas geradas nas simulações se aproximaram daquelas geradas nas condições reais. Para a variação da massa, todos os fatores se mostraram significativos. Os corpos de prova, na região da entrada, romperam-se sob tração e mostraram-se mais resistentes e rígidos que os localizados na região da linha de solda. Não se observou o rompimento dos corpos de prova com linha de solda que se alongaram até o limite estabelecido no ensaio. Conclui-se que o molde desenvolvido atende às demandas de pesquisas envolvendo linhas de solda em produtos plásticos.

Palavras-chave: Moldagem por injeção, Linha de solda, Instrumentação, Massa, Polipropileno.

The production of consumer goods, using plastics, has been increasing significantly around the world. For have a tuning in the automation in relation to the molds, quality control has been improving the parameters demanding better indexes. The monitoring of parameters with sensors in the mold cavity has been growing gradually in Europe and the US, and has found barriers within Brazil due to the high cost. This work deals with the development of an instrumented mold for the evaluation of welding lines in plastic components. A mold was designed based on a geometry that allows the formation of traction proof bodies with and without the presence of a weld line. The mold was instrumented with pressure and temperature sensors in the regions of entry and formation of the weld line. In order to evaluate the mold, PP (Braskem H503) injection was carried out according to a complete factorial design 4^2 with the following factors: injection flow (20 and 40 cm³ / s); set pressure (40 and 60%); holding time (3 and 5 s) and location (input and weld line). The experimental conditions were simulated in SolidWorks Plastics software for comparison of pressure curves. The quality of the test bodies was evaluated by the measurement of the mass and mechanical properties obtained through a tensile test. The curves generated in the simulations in a certain way approximated those generated in the real conditions. For the mass variation all factors were significant. The specimens in the region of the entrance broke under tensile test and were more resistant and rigid than those located in the region of the weld line. No rupture of weld line specimens was observed that elongated up to the limit established in the test. It is concluded that the mold developed meets the demands of research involving welding lines in plastic products.

Key words: Injection molding, weld line, Weight, Tensile test, Polypropylene, Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Divisão das categorias do polímero.	17
Figura 2: Fases do ciclo de injeção de termoplásticos.....	19
Figura 3: Configuração de um molde para injeção de plásticos.....	20
Figura 4: Máquina Injetora.....	25
Figura 5: Máquina Injetora Horizontal, dividida em suas principais áreas.....	26
Figura 6: Máquina Injetora Vertical, dividida em suas principais áreas.....	26
Figura 7: Área do plano de injeção AP, Espessura (S) e Linha de fluxo (LF).....	27
Figura 8: Zona de aquecimento no cilindro da máquina e valores típicos de temperaturas.....	29
Figura 9: Gráfico simplificado de temperatura x tempo de resfriamento.....	31
Figura 10: Simulação do Processo de Injeção.....	33
Figura 11: Exemplo de simulação do tempo de preenchimento.....	34
Figura 12: Exemplo de simulação de contração dimensional.....	34
Figura 13: Exemplo de simulação de resfriamento.....	35
Figura 14: Exemplo de simulação de empenamento.....	35
Figura 15: Exemplo de malha na simulação.....	36
Figura 16: Demonstrativo de sensores num molde acadêmico.....	37
Figura 17: Exemplo de variação da pressão durante o processo de injeção.....	38
Figura 18: Variação da temperatura de injeção durante o processamento.....	39
Figura 19: Formações típicas de linha de solda (I) fria e (II) quente.....	40
Figura 20: Esquema de formação de linhas de solda quente.....	40
Figura 21: Geometria escolhida para teste.....	43
Figura 22: Dimensionamento padrão ASTM D638 Tipo I.....	44
Figura 23: Demonstrativo do porta molde 30x30.....	45
Figura 24: Desenho evidenciando os canais de resfriamento.....	46
Figura 25: Localização dos sensores.....	47
Figura 26: Fotografia do posição para sensor de temperatura.....	47
Figura 27: Representação em CAD do molde montado.....	48
Figura 28: Molde em processo de fabricação.....	48
Figura 29: Placa Suporte em processamento de furação.....	49
Figura 30: Geometria usinada na cavidade inferior, sem polimento.....	50
Figura 31: Molde de injeção da geometria.....	50
Figura 32: Molde de injeção da geometria.....	52

Figura 33: Parâmetros de temperatura para o cilindro da máquina injetora.....	53
Figura 34: Sensor de Pressão Priamus”.....	54
Figura 35: PRIAMUS Easy Charge Amplifier Type 5050A-M04.....	55
Figura 36: Dados da Interface da Máquina Injetora.....	55
Figura 37: Dados da Pressão de Recalque na Interface da Máquina Injetora do 1º Ciclo.	56
Figura 38: Sensor de Temperatura Priamus”.....	56
Figura 39: Gráfico das temperaturas do 1º experimento.	57
Figura 40: Pressão no ponto de injeção.....	57
Figura 41: Pressão nos pontos dos sensores de pressão.....	58
Figura 42: Temperatura nos pontos dos sensores de temperatura.....	58
Figura 43: Medição da massa.....	59
Figura 44: Relatório do Ensaio de Tração V40 R60 TR3 EI.....	60
Figura 45: Tensão x Deformação Especifica V40 R60 TR3 EI.....	60
Figura 46: Curva de pressão das condições V40/R60/TR3 (a) e V40/R60/TR5 (b).....	62
Figura 47: Curva de pressão das condições V40/R40/TR3 e V40/R40/TR5.....	63
Figura 48: Curva de pressão das condições V20/R60/TR3 e V20/R60/TR5.....	64
Figura 49: Curva de pressão das condições V20/R40/TR3 e V20/R40/TR5.....	65
Figura 50 - Massa do corpo de prova através das condições.....	66
Figura 51: Resultados da massa para os fatores analisados.....	67
Figura 52 - Tensão x Deformação Especifica V40 R60 TR3 EI.....	67
Figura 53 - Tensão x Deformação Especifica V40 R60 TR3 LS.....	68
Figura 54 - Resultados da tensão máxima para as condições analisadas.....	68
Figura 55: Resultados de tensão máxima para os fatores analisados.....	69
Figura 56 - Resultados do módulo de elasticidade para as condições analisadas.....	70
Figura 57: Resultados de módulo de elasticidade para os fatores analisados.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de temperatura para os polímeros.....	29
Tabela 2 – Propriedade do polímero H503.....	52
Tabela 3 – Resumo do planejamento fatorial estabelecido.	53
Tabela 4 – Tabela com as condições experimentais e parâmetros utilizados.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Configuração dos principais componentes do molde para injeção de polímeros. .21	
Quadro 2 - Configuração dos modelos de molde para injeção de polímeros.....24	

APÊNDICE

Apêndice 1 - Resultados complementares do experimento 40/60/3.....	77
Apêndice 2 - Resultados complementares do experimento 40/60/5.....	79
Apêndice 3 - Resultados complementares do experimento 40/40/3.....	81
Apêndice 4 - Resultados complementares do experimento 40/40/5.....	83
Apêndice 5 - Resultados complementares do experimento 20/60/3.....	85
Apêndice 6 - Resultados complementares do experimento 20/60/5.....	87
Apêndice 7 - Resultados complementares do experimento 20/40/3.....	89
Apêndice 8 - Resultados complementares do experimento 20/40/5.....	91

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

P	- Pressão
t	- Tempo
kg	- Quilograma
cm ³	- Centímetro cúbico
kN	- Quilo Newton
s	- Segundos
mm/s	- Milímetro por segundo
mg	- Miligrama
mm/min	- Milímetro por minuto
N	- Newton
mm	- Milímetro
g/cm ³	- Grama por centímetro cúbico
MPa	- MegaPascal
HR	- Dureza Rockwell
J/m	- Joule por metro
°C	- Graus Celsius
pC	- Picocoulumb
Ω	- Ohm
NiCrSi	- Níquel Cromo Silício
NiSi	- Níquel Silício
Pi	- Pressão de Injeção (kgf/cm ²)
Ph	- Pressão hidráulica de injeção (kgf/cm ²)
di	- Diâmetro do cilindro hidráulico de injeção (cm)
dp	- Diâmetro da rosca de injeção (cm)
Tc	- Tempo de resfriamento (s);
S	- Espessura (mm)
Tm	- Temperatura de injeção (°C)
Tw	- Temperatura do molde (°C)
Te	- Temperatura de extração (°C)
α _{ef}	- Difusividade térmica efetiva (mm ² /s)

LISTA DE ABREVIATURAS

- PP - Polipropileno
- EI - Entrada de Injeção
- LS - Linha de Solda
- CP - Corpo de Prova
- V - Velocidade de injeção
- R - Pressão de Recalque
- TR - Tempo de Recalque
- Fig - Figuras
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- CAD - Desenho assistido por computador
- CAE - Engenharia auxiliada por computador
- CAM - Manufatura assistida por computador
- CNC - Controle Numérico Computadorizado
- SAE - *Society of Automotive Engineers*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- PBS - Placa base superior
- PPCS - Placa porta cavidade superior
- PPCI - Placa porta cavidade inferior
- PS - Placa suporte
- PBI - Placa base inferior
- PE - Placa extratora
- CPE - Contra placa extratora

INTRODUÇÃO	13
1.1 Generalidades	13
1.2 Justificativa e Relevância	14
1.4 Objetivos.....	14
1.4.1 Objetivo principal	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
ESTADO DA ARTE.....	16
2.1 Introdução.....	16
2.2 Polímero	16
2.3 Processo de injeção de Polímeros.....	18
2.4 Moldes de Injeção.....	20
2.5 Máquinas Injetoras	25
2.6 Parâmetros de Injeção.....	26
2.7 Simulação do processo de injeção.....	32
2.8 Instrumentação de Moldes de Injeção.....	36
2.8.1 Monitoramento da pressão na cavidade.....	37
2.8.2 Monitoramento da temperatura na cavidade.....	38
2.9 Defeitos em Peças Injetadas (Linha de Solda)	40
GEOMETRIA DE TESTE, PROJETO E FABRICAÇÃO DO MOLDE.....	42
3.1 Introdução.....	42
3.2. Processo de Desenvolvimento da Geometria para Teste.....	42
3.3. Processo, Projeto e Fabricação do Molde de Injeção.....	44
MATÉRIAS E MÉTODOS	51
4.1 Introdução.....	51
4.2 Seleção do polímero.....	52
4.3 Injeção dos corpos de prova	53
4.4 Monitoramento da pressão e da temperatura na cavidade.....	54
4.5 Simulação do processo de injeção	57
4.6 Medição da massa.....	58
4.7 Ensaio mecânicos.....	59
RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 Comparações entre peças moldadas e simuladas: curvas de pressão na cavidade.....	61

5.2 Resultado da avaliação da massa.....	66
5.3 Resistência mecânica.....	67
CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICES	77

1.1 Generalidades

O uso de plásticos vem aumentando gradativamente na produção de bens de consumo, para as indústrias de produtos eletroeletrônicos, automobilísticos, alimentícios, para a saúde, entre outros. O domínio do processo de moldagem por injeção exige conhecimentos de muitas outras técnicas, como o processo de projeto e fabricação de moldes, máquinas injetoras, composições dos materiais a serem injetados e controle de qualidade.

O processo de injeção pode ser monitorado através de medições de pressão e temperatura com sensores, diretamente instalados nas cavidades do molde. Com estas informações é possível saber como ocorrem às diversas fases do processo de injeção, desde o preenchimento volumétrico da peça, o momento de comutação, o recalque até o resfriamento. Os parâmetros de processamento podem ser ajustados de maneira bastante facilitada através da visualização dos gráficos de pressão e temperatura na cavidade. Com relação à qualidade de uma peça injetada, vários problemas que ocorrem no processo de injeção podem ser minimizados com o conhecimento das curvas de pressão e temperatura na cavidade dentre eles, rebarbas, rechupes, preenchimento incompleto, empenamento, tensões residuais etc. Apesar das referidas vantagens apresentadas, sensores de pressão e temperatura têm um custo elevado e normalmente são utilizados em aplicações ou moldes para peças com maior rigor técnico.

Verifica-se que a maioria dos moldes de injeção não possuem sensores nas cavidades. Devido ao seu alto custo, percebe-se que, na prática, o ajuste dos parâmetros de injeção é realizado através de métodos baseados em experimentos, como por exemplo, o método *short shot*. Desta forma, geralmente são desperdiçadas grandes quantidades de material e tempo até a determinação dos corretos parâmetros de injeção. Além disso, a qualidade da peça pode ser verificada somente após a injeção, muitas vezes, através de ensaios e métodos de caracterização.

Os programas computacionais para a simulação do processo de injeção surgiram como uma alternativa para auxiliar tanto o projeto de moldes quanto para estabelecer os parâmetros de injeção necessários para ajuste da máquina injetora. O módulo *Plastics* incorporado recentemente ao *software Solidworks* pode auxiliar nestas questões. Pretende-se, neste

trabalho, avaliar a linha de solda em componentes plásticos, através do desenvolvimento do molde instrumentado com auxílio do *SolidWorks Plastics*.

1.2 Justificativa e Relevância

Os últimos anos foram desafiadores para todos os setores produtivos do Brasil. A baixa produtividade industrial, diminuindo o consumo por parte da população e das grandes companhias, levou à recessão da economia brasileira, que recuou 3,6% no último ano de 2016 e não cresceu no primeiro semestre de 2017. Importantes setores, como o automobilístico e o da construção civil, sofreram estagnação e retração desde 2014, e os efeitos, como não poderiam deixar de ser, refletiram-se no nosso setor de transformação termoplástica. No entanto, em momentos de retração da economia, a indústria teve que buscar novos desafios de atuação. E um dos caminhos a trilhar nesse sentido, certamente, é o do aumento da competitividade (ABIPLAST, 2014).

A indústria de transformação de termoplásticos tem grande importância na produção de bens de consumo, tendo, no ano de 2016, alcançado o valor 65,7 bilhões de reais (Abiplast 2016). Os parâmetros de processamento influenciam a qualidade do produto, sua estabilidade dimensional, propriedades mecânicas e superficiais. Uma das maneiras de melhorar o processo de injeção, acredita-se, é através do monitoramento e controle da temperatura e pressão na cavidade do molde. Esse procedimento poderá contribuir para uma diminuição nos índices de refugo e aumento da vida útil das cavidades do molde e da máquina injetora.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver e avaliar um molde instrumentado para estudo de linhas de solda em componentes plásticos, visando ao ajuste e à comparação de parâmetros de injeção.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um molde com geometria para avaliar a resistência de componentes injetados com linha de solda;
- Comparar resultados de simulação do processo de injeção com resultados experimentais, mediante a curva de pressão na cavidade;

- Avaliar a qualidade de peças injetadas através de medição da massa e resistência à tração.

2.1 Introdução

Segundo Martins (2014), a indústria de plásticos mundial obteve taxa de crescimento média de 8,6%, no período de 1950 a 2012. Nesse período, os produtos plásticos se tornaram universalmente utilizados, de forma que estão presentes nos mais diversos segmentos, dentre os quais podemos citar: construção civil, alimentos e bebidas, automóveis, máquinas, equipamentos, eletrônicos, entre outros. Destaque-se a área médica, cujas mais recentes técnicas médicas usam plásticos para desbloquear os vasos sanguíneos, desenvolver aparelhos auditivos e até mesmo córneas artificiais. Percebe-se que a produção mundial de plásticos vem obtendo crescimento considerável, sendo a China a grande força motriz desta elevação na produção, de forma que, em 2012, este país figurou como grande produtor de plásticos no mundo, com cerca de 69 milhões de toneladas de artigos plásticos (23,9%). Na sequência dessa força produtiva vem a Europa (20,4%), NAFTA3 (19,9%) e demais países da Ásia (15,8%), como sendo as regiões/países de grande relevância na indústria de transformadores plásticos. Muito embora o Brasil tenha segmentos de alta competitividade, a exemplo do automotivo, o de alimentos e o de bebidas, nosso país apresenta participação de apenas 2,2% do volume produzido mundialmente.

Após essa introdução macro sobre o crescimento do processo de injeção de plástico, será abordado, nesse capítulo, o processo de injeção de plásticos, tratando desde polímeros, moldes de injeção, máquina injetora, parâmetros de injeção, simulação do processo de injeção até instrumentação do molde e defeitos em peças injetadas como linha de solda.

2.2 Polímero

A origem da palavra polímero vem do grego, cujo significado é muitas partes (Poli: muitas, Mero: partes). O interesse pelos materiais poliméricos se intensificou no século XVI, com a extração da borracha natural. A partir daí passou-se a estudar os materiais poliméricos e a desenvolvê-los. Mas, o primeiro polímero sintético produzido, de fato, foi o baquelite, em 1912, por Leo Baekeland. Um pouco mais tarde, com o desenvolvimento dos polímeros e estudos a respeito, ampliou-se o leque de propriedades e de características dos materiais. Existe, hoje, uma quantidade tão grande de polímeros com propriedades diferentes entre si,

que é possível dividi-los em várias categorias diferentes. Na Figura 1, Mano e Mendes (2004) confirmam as afirmações acima e simplificam a divisão das categorias dos polímeros.

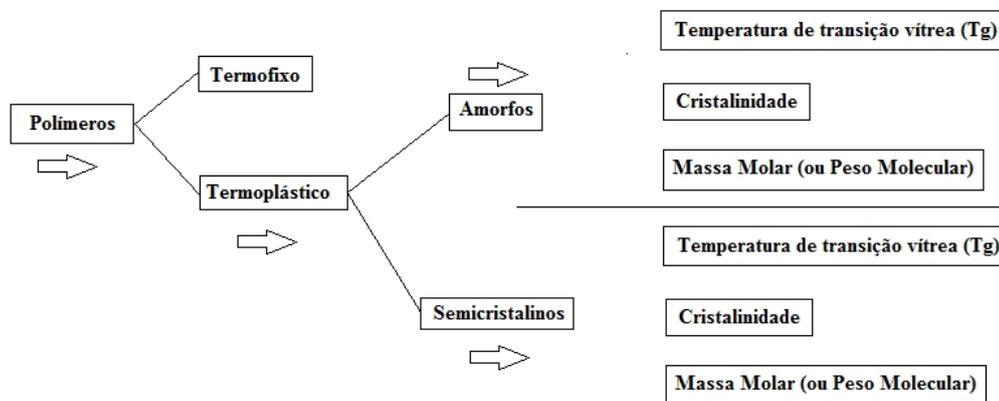


Figura 1: Divisão das categorias do polímero.
Fonte: Mano e Mendes 2004.

- **Termofixos** – também chamados de termorrígidos ou termo endurecidos. São polímeros artificiais que, após serem processados, adquirem a formação de ligações permanentes que dificultam sua reciclagem.
- **Termoplásticos** – são polímeros que, com o aumento da temperatura, adquirem fluidez e se tornam rígidos novamente ao serem resfriados. Podem ser moldados repetidas vezes e, assim, serem considerados materiais recicláveis. Os termoplásticos se encontram em dois estados que são amorfo e semicristalino:
 - Amorfo - são macromoléculas poliméricas dispostas sem uma configuração particular. Quando são aquecidas as estruturas moleculares se tornam mais maleáveis, até finalmente fluírem. Como não existem interfaces cristalinas para refletir a luz, esses materiais são frequentemente translúcidos.
 - Semicristalino - as moléculas formam arranjos ordenados. Essas regiões são cristais que se formam durante a solidificação do material fundido. Com o reaquecimento, os cristais continuam intactos até o material atingir a temperatura de fusão cristalina. Quando fundidos, esses materiais têm uma configuração molecular amorfa. São chamados de semicristalinos por apresentarem também regiões amorfas no estado sólido.

Conforme visto na Figura 1, existem várias outras formas de subdividir os materiais poliméricos, mas isso depende muito do interesse de quem os divide. Existem vários fatores que influenciam as características dos polímeros e os tornam tão diferentes uns dos outros, mas os mais básicos são: a Temperatura de Transição Vítrea (Tg), a Cristalinidade e a Massa Molar.

2.3 Processo de injeção de Polímeros

Nas últimas décadas, vem se observando um crescimento constante do emprego de produtos plásticos que podem ser fabricados a partir de vários processos de transformação, a saber: injeção, extrusão, termoformagem, dentre outros. A injeção de produtos plásticos é o processo com o maior valor agregado. Com esses processos de fabricação, são impulsionadas indústrias de fabricação de moldes, popularmente chamadas de ferramentarias. Essas empresas têm como suas principais características a elevada qualificação profissional, máquinas, ferramentas e sistemas - CAD/CAE/CAM. Os moldes são bens ou serviços específicos e de quantidade unitária que requerem uma grande agilidade no processo.

O processo de moldagem por injeção foi patenteado pelos irmãos Hyatt, em 1872 (Abreu, 2012), tendo sido desenvolvido, inicialmente, para a transformação de resinas termofixas. Com a evolução dos polímeros, ao longo do século XX, foram desenvolvidas novas resinas termoplásticas.

Conforme Miranda (2012), o processo de injeção é um processo versátil que pode produzir peças de diferentes dimensões, com alta produtividade, precisão dimensional e elevado volume de produção. A injeção é responsável por 1/3 do total da transformação de termoplásticos.

Domingues (2012) afirma que, diferente de processos como os de extrusão ou laminação, o processo de injeção é um processo cíclico o qual apresenta diferentes fases, conforme listadas abaixo:

1. Fechamento do molde de injeção;
2. Injeção do material no interior da cavidade do molde;
3. Recalque do material polimérico;
4. Plastificação ou dosagem da carga de material necessária para injeção do próximo ciclo;
5. Resfriamento do material plástico até sua solidificação;

6. Abertura do molde;
7. Extração do produto injetado.

Domingues (2012) afirma, também, que durante o processo de plastificação é conferido calor necessário para plastificar a resina. Com isso, durante o resfriamento o mesmo sofre contração volumétrica que pode gerar peças defeituosas, dimensionalmente ou até esteticamente. A Figura 3 apresenta as fases relativas ao ciclo de injeção de termoplásticos.

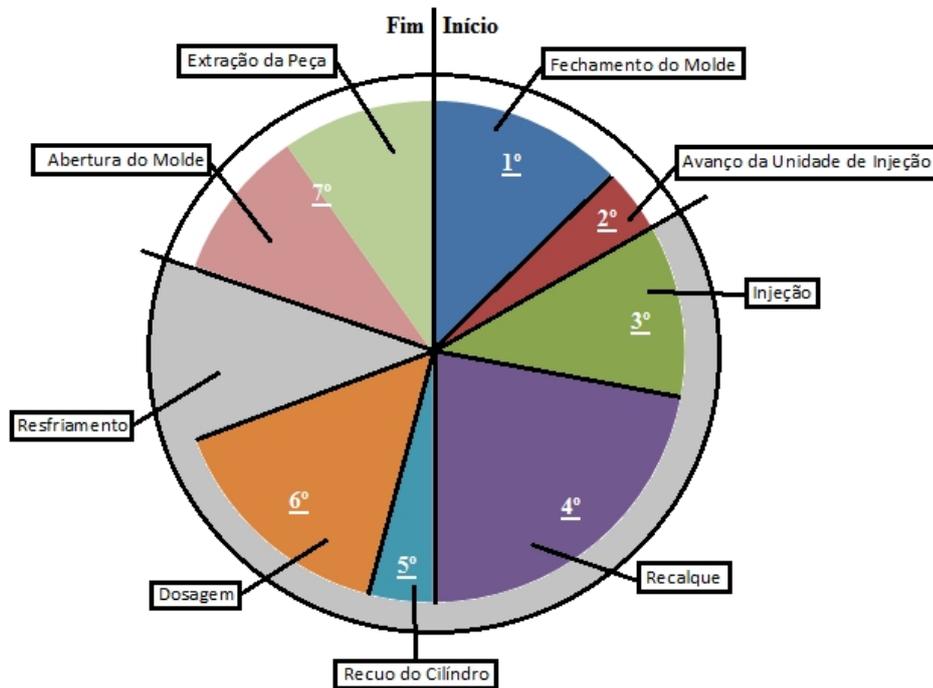


Figura 2: Fases do ciclo de injeção de termoplásticos.
Fonte: Site Molde Injeção Plásticos (2017).

Fechamento: Conforme Harada (2006), no processo de injeção do plástico, a força de fechamento, desenvolvida por uma injetora, deve ser necessária para manter o molde fechado durante o ciclo de injeção de plástico. A força de fechamento deve ser maior que a pressão de injeção, por isto, na prática, acrescentam-se 10 a 15% para garantir o fechamento.

Injeção: Num contexto geral, a injeção no molde corresponde ao fluxo do material polimérico, saindo do cilindro da injetora, sendo transportado para as cavidades numa determinada velocidade. O processo acarretará no aumento da pressão dentro do molde. Neste trajeto, o material passa pela bucha de injeção, alimentando os canais de distribuição até preencher a cavidade do molde.

Recalque: Afirma Becker (2012) que, no momento de recalque, ocorre a comutação de um fluxo controlado pela vazão para um fluxo controlado pela pressão. Na etapa de recalque, o

polímero é mantido sob pressão até que o ponto de injeção se solidifique, garantindo que o moldado adquira rigidez suficiente para manter a forma final do produto.

Dosagem: Dosagem é a etapa na qual a unidade de injeção plastifica e transporta a quantidade de material polimérico para ser injetado no próximo ciclo.

Resfriamento: Resfriamento é o processo de solidificação do polímero dentro da cavidade do molde. O procedimento, além de influenciar na vida útil das cavidades, garante uma maior produtividade e menor manutenção do molde.

Abertura e Extração: Encerrada a etapa de resfriamento, o molde é aberto e a peça é retirada por extratores. Esse processo pode ser efetuado por meios mecânicos, hidráulicos, elétricos ou pneumáticos; dependendo da geometria do produto e da concepção do molde.

2.4 Moldes de Injeção.

Segundo Silva (2009), um molde de injeção pode ser definido como uma ferramenta construída individualmente que, adaptadas a uma máquina de injeção, possibilita produzir produtos plásticos de forma variada, com pouca ou grande complexidade, através de um ciclo produtivo, possuindo boa repetitividade no que se refere à forma, ao acabamento e a tolerâncias dimensionais do produto moldado.

Conforme Harada (2006), o molde de injeção é dividido num conceito básico, em duas partes: fixa e móvel, conforme se pode visualizar na Figura 4.

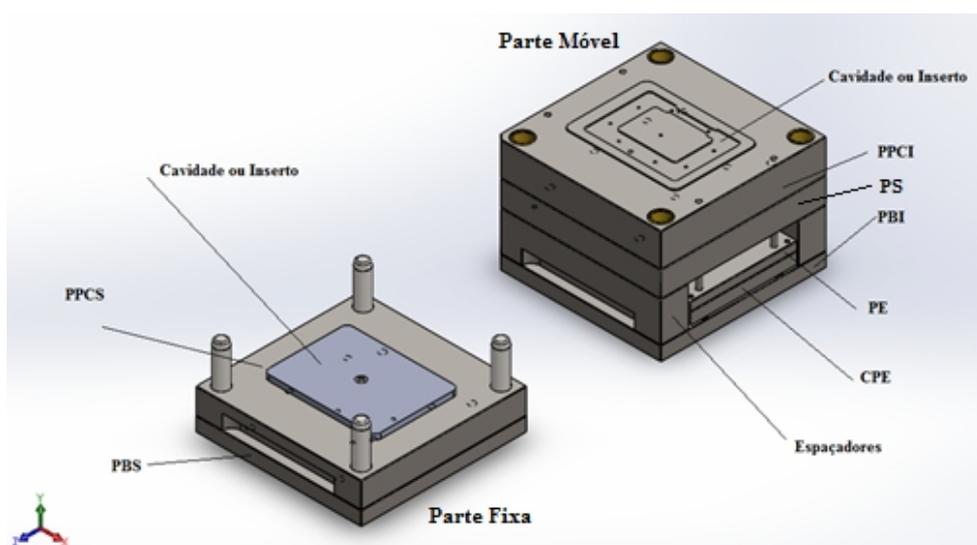
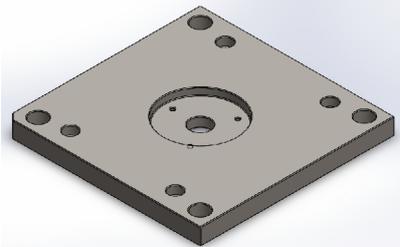
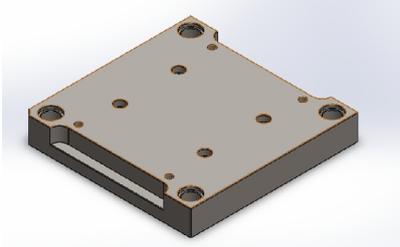
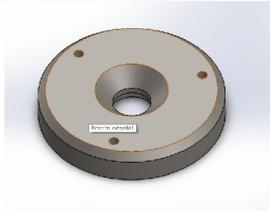
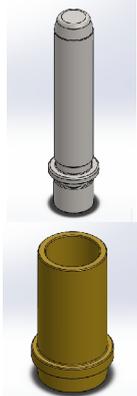


Figura 3: Configuração de um molde para injeção de plásticos. Placa base superior (PBS), placa porta cavidade superior (PPCS), placa porta cavidade inferior (PPCI), placa suporte (PS), placa base inferior (PBI) placa extratora (PE), contra placa extratora (CPE).

- **Parte Fixa** - é composta pela placa base superior, porta cavidade superior, anel de centragem e colunas guias. Este conjunto de placas e componentes é fixado na parte fixa da máquina injetora onde fica localizada a bucha de injeção.
- **Parte Móvel** - é composta pela placa base inferior, porta cavidade inferior, placa suporte ou choque, calços ou placas espaçadores, buchas guias, placa extratora, contra placa extratora, coluna extratora, bucha extratora, pino top, pino de retorno. Este conjunto de placas e componentes é fixado na parte móvel da máquina injetora, onde fica localizado o pino de acionamento da extração.

O Quadro 1 ilustra os principais componentes de um molde e suas denominações, material usado no cotidiano e sua função dentro do molde de injeção de plástico.

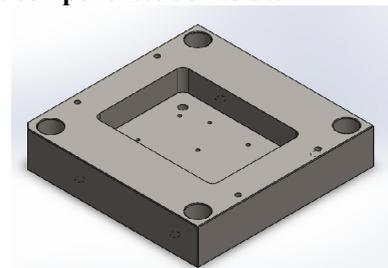
Quadro 1 - Configuração dos principais componentes do molde para injeção de polímeros.

<i>Denominação</i>	<i>Descrição</i>	<i>Imagem</i>
Placa Base Superior (PBS)	Placa base superior ou placa de fixação. Construída em aço médio carbono ABNT/SAE 1045 ou ABNT/AISI H13, tem a função de fixar o conjunto superior do molde à injetora.	
Placa Porta Cavidade Superior (PPCS)	Placa cavidade ou placa porta posição superior. Função de alojar as cavidades ou posições da cavidade. Ponto que determina a linha de fechamento. Fabricada em aço médio carbono ABNT/SAE 1045 ou ABNT/AISI H13.	
Anel de Centragem	Sua principal função é centralizar a bucha com o bico de injeção. Fabricado em aço ABNT/SAE 1045 e temperado.	
Coluna Guia e Bucha Guia	Função de centralizar o conjunto superior ao conjunto inferior do molde. Construída em Aço Cromo Níquel, ABNT/SAE 8620 ou ABNT/SAE 8640 e cementada.	

Quadro 1 - Continuação da configuração dos principais componentes do molde.

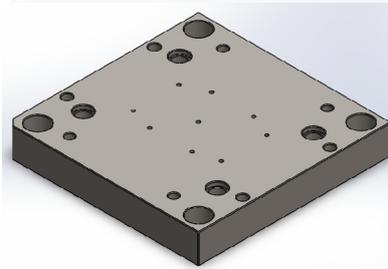
Placa Porta Cavidade Inferior (PPCI)

Placa porta machos ou placa porta posição inferior. Função de alojar os machos ou as cavidades. Ponto que determina a linha de fechamento. Fabricada em aço de médio carbono ABNT/SAE 1045 ou ABNT/AISI H13.



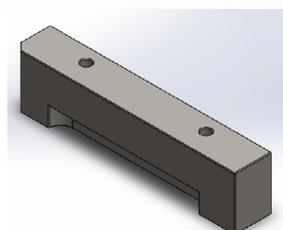
Placa Suporte (PS)

Função de suportar toda a pressão de injeção exercida no molde durante injeção do material. Suportar as pancadas do conjunto extrator. Fabricada em aço de médio carbono ABNT/SAE 1045.



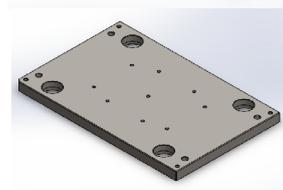
Bloco Espaçador

Popularmente conhecido como calço e sua função é de limitar o curso do conjunto extrator. Fabricado em aço ABNT/SAE 1045.



Placa Extratora (PE)

Função de alojar a cabeça dos pinos extratores. Fabricada em aço ABNT/SAE1045.



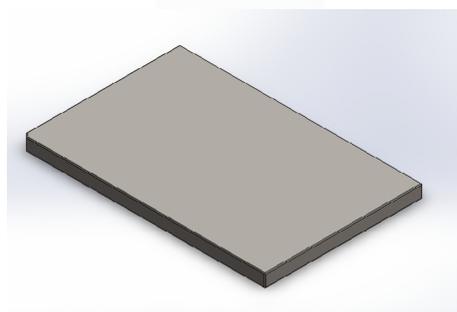
Pino Guia Extrator

Desempenha a função de guiar ou alinhar conjunto extrator com placa suporte.



Contra Placa extratora (CPE)

Conhecida como placa impulsora. Função de receber o movimento de avanço da haste do cilindro hidráulico de extração da injetora para extrair o moldado. Também é responsável pelo acionamento dos pinos extratores. Fabricada em aço de baixo carbono.



Pino de Retorno

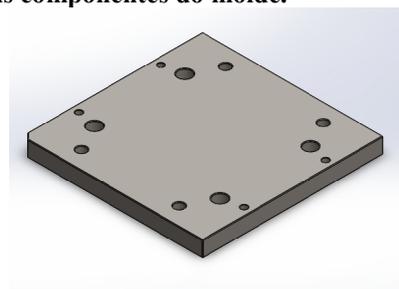
O pino de retorno tem a função de garantir o retorno dos pinos extratores para esses não atingirem as cavidades superiores. Fabricado em SAE 52100 temperado e revenido.



Quadro 1 - Continuação da configuração dos principais componentes do molde.

Placa Base Inferior (PBI)

A placa base inferior tem a função de fixar o conjunto inferior do molde à placa móvel da injetora. Fabricada em aço ABNT/SAE 1045.



Pino Top

O pino top tem a função de fazer ajuste fino nos pinos extratores.



Molas

Fabricadas em liga de aço cromo de alta resistência. Seções das molas são retangulares, suporta cargas de choque e constantes deflexões a alta velocidade.

- Cor verde – Carga Leve;
- Cor azul – Carga Média;
- Cor vermelha – Carga Pesado;
- Cor amarela – Carga Extra Pesada.



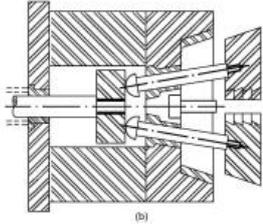
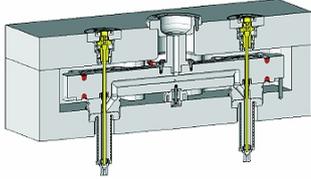
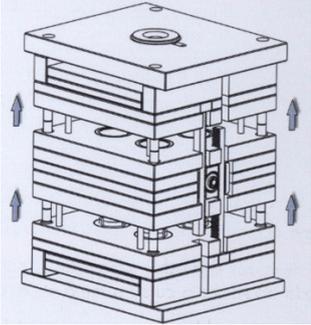
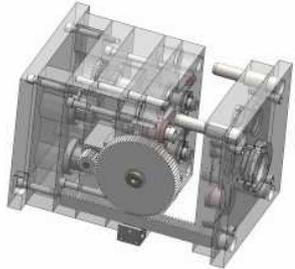
Conforme Becker (2012), molde de injeção é classificado de acordo com a norma DIN 1670, denominada moldes de injeção e compressão de componentes em: moldes de duas placas, moldes de três placas ou placa flutuante, moldes com partes móveis, moldes com canal quente, *stack molds* e moldes com núcleo rotativo.

O Quadro 2 ilustra os principais componentes de um molde de injeção e suas denominações, material usado no cotidiano e sua função dentro do molde de injeção de plástico.

Quadro 2 - Configurações dos moldes para injeção de polímeros.

<i>Modelo</i>	<i>Denominação</i>	<i>Imagem</i>
Duas Placas	Molde mais simples, composto da parte móvel e da fixa, é o molde mais utilizado.	
Três Placas ou Placa Flutuante	Composto além da placa fixa e móvel da placa flutuante, que tem como função separar o canal de distribuição do componente injetado.	

Quadro 2 - Configuração dos modelos de molde para injeção de polímeros.

Parte Móvel	Possui componentes que se movimentam em direções diferentes a da abertura do molde.	
Canal Quente	Neste tipo de molde há acessórios que mantêm elevada a temperatura do material polimérico no interior do molde, fazendo com que o mesmo chegue mais rápido à cavidade e que, assim, não se necessite de canais de alimentação.	
Stack Molds	O molde que possui a sua abertura em duas regiões, possibilitando assim a obtenção de um número maior de componentes injetados.	
Núcleo Rotativo	Utilizado para componentes injetados que possuem regiões com roscas.	

Para a eficiência do processo de produção de componentes injetados, os moldes de injeção são equipados com: sistema de alimentação, sistema de resfriamento, sistema de extração e os elementos de guiamento.

- **Sistema de alimentação:** desempenha a função de orientar o material fundido para dentro da cavidade através da pressão;
- **Sistema de resfriamento:** dissipa o calor para que ocorra o resfriamento do produto possibilitando sua extração;
- **Sistema de extração:** empurra o produto moldado para fora do molde;
- **Elementos de guiamento (colunas e buchas):** utilizadas para o alinhamento do conjunto fixo com o móvel.

As placas, parafusos, buchas, pinos-guia entre outros ou mesmo os sistemas de alimentação, sistema de resfriamento, sistema de extração constituintes do molde são determinados, seja através de cálculos, simulações em software adequado ou mesmo pela

experiência prática do projetista, a fim de garantir a funcionalidade do molde durante o processo de injeção, em consequência da qualidade na transformação do material polimérico em um produto especificado.

2.5 Máquinas Injetoras

A máquina injetora de plásticos é o equipamento utilizado para fabricação cíclica de produtos moldados, pela injeção de material plástico no molde, que contém uma ou mais cavidades, onde o produto é conformado em sua geometria definida. A máquina injetora consiste, essencialmente, da unidade de fechamento, unidade de injeção, sistemas de controle e acionamento (Fig. 4).



Figura 4: Máquina Injetora.
Fonte: Arbug GmbH + Co. KG

Conforme Silva (2009), a máquina injetora, que inicialmente foi criada para a transformação de termofixos (como o Baquelite), teve um enorme desenvolvimento com o avanço dos materiais termoplásticos após a Segunda Guerra Mundial. No cenário mercadológico atual, a moldagem por injeção é um dos principais processos de transformação de materiais de polímeros, com enorme importância nos grandes mercados consumidores, como, embalagens, construção civil, automobilística e de material elétrico, eletrônico, entre outros.

Terminologicamente, as máquinas injetoras são classificadas em dois modelos: horizontal (Fig. 5) e vertical (Fig.6). Com referência às máquinas injetoras horizontais, elas são máquinas nas quais o sistema de fechamento e a movimentação do molde ocorre no eixo horizontal, como descreve sua classificação. Para o modelo vertical, usa-se a mesma

definição, nas quais o sistema de fechamento e o movimento do molde ocorrem no eixo vertical.

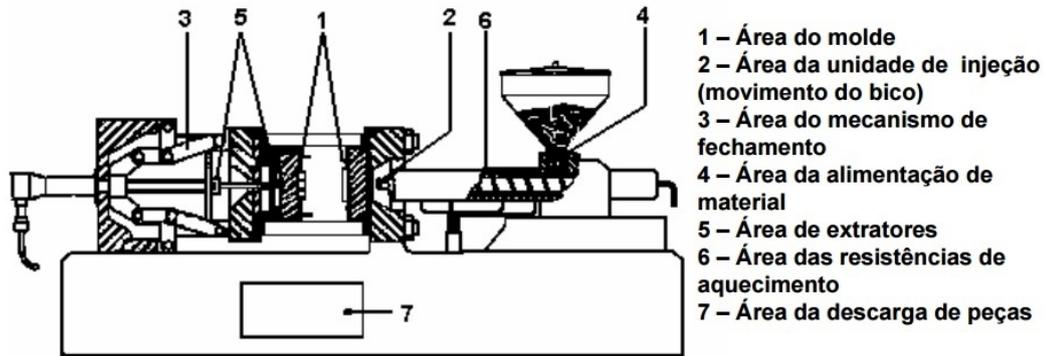


Figura 5: Máquina Injetora Horizontal, dividida em suas principais áreas.
 Fonte: Silva (2009)

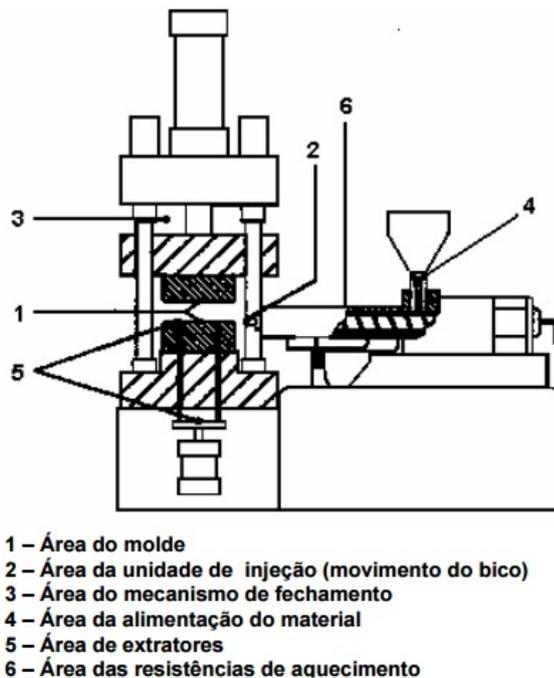


Figura 6: Máquina Injetora Vertical, dividida em suas principais áreas.
 Fonte: Silva (2009)

2.6 Parâmetros de Injeção.

Através da afirmação de Silva (2012), não somente conhecimento e experiência são requeridos para a resolução de problemas de moldagem. A resolução de erros no processo de peças moldadas requer uma boa experiência sobre reologia, equipamentos e um entendimento do processo de injeção.

Silva (2012) também relata que a injeção de plásticos é influenciada por muitas variáveis, tais como: temperatura, pressão, tempo, eficiência da injetora (projeto da rosca), funcionamento dos controles, instrumentação da injetora, o tipo de polímero processado e a sua distribuição de peso molecular. Além desses parâmetros, menciona que podem influenciar o grau de atenção do operador e as suas habilidades, o projeto da geometria, o projeto do molde, como também a construção do molde.

Conforme Becker (2012), para usufruir da tecnologia e de toda eficiência da máquina injetora é necessário um bom entendimento do processo de injeção. Neste sentido, é importante entender os parâmetros de processamento que a injetora utiliza para processar e transformar o polímero em um produto final. Conforme o autor, os principais parâmetros utilizados são: força de fechamento, velocidade de injeção, pressão de injeção, pressão de recalque, temperatura de injeção, temperatura do molde, tempo de injeção, tempo de recalque, tempo de resfriamento e o volume de dosagem. Uma breve descrição dos principais parâmetros é apresentada a seguir:

Força de fechamento – É a força variando conforme a geometria de cada produto confeccionado em cavidade acoplada no molde. Para determinar a força de fechamento do molde na máquina injetora, e escolher-se a máquina ideal, necessita-se de alguns parâmetros (Fig. 8), tais como: linha de fluxo, área do ponto de injeção e espessura média da parede do produto a ser injetado.

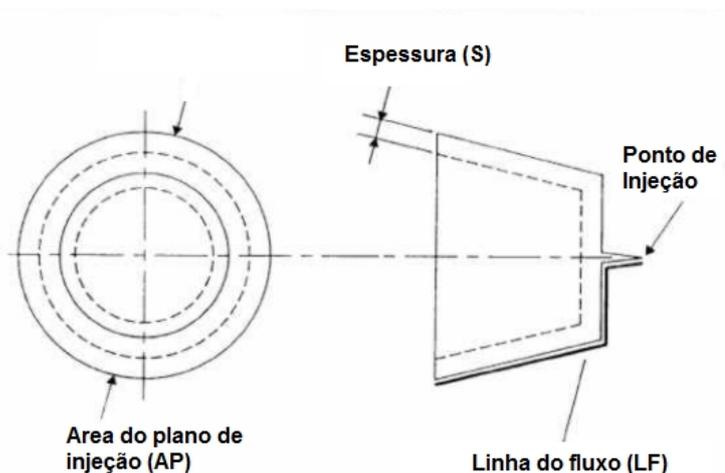


Figura 7: Área do plano de injeção AP, Espessura (S) e Linha de fluxo (LF).
Fonte: Becker 2012.

Velocidade de injeção – é a velocidade com a qual o material fundido preenche as cavidades do molde. Quanto maior essa velocidade, mais rápido a cavidade é preenchida, porém, se for ativada em excesso, a velocidade pode causar defeitos de injeção.

Para Jorge (2010), a velocidade de injeção é a velocidade com que a massa é enviada para dentro do molde durante a fase de preenchimento. Conhecendo a velocidade de deslocamento linear da rosca recíproca, que possui dimensão fixa, e a vazão do material, relaciona-se esta vazão junto ao canal por onde o fluido polimérico vai percorrer. Algumas máquinas trazem como padrão de velocidade de injeção máxima o valor máximo da vazão (cm^3/s).

Pressão de injeção - é a pressão necessária para o preenchimento do molde. A pressão de injeção depende do material, temperatura do molde, canais de injeção entre outros (Araújo, 2010).

A pressão da injeção pode ser calculada conforme a equação 1:

$$P_i = P_h \cdot \frac{d_i^2}{d_p^2} \quad (1)$$

Onde:

- P_i = Pressão de Injeção (Kgf/cm^2);
- P_h = Pressão hidráulica de injeção (Kgf/cm^2);
- d_i = Diâmetro do cilindro hidráulico de injeção (cm);
- d_p = Diâmetro da rosca de injeção (cm).

Pressão de recalque – Durante o processo de resfriamento, o material injetado contrai na cavidade, portanto, deve-se injetar quantidade maior de material, para manter constante o volume da peça. Por causa desse fenômeno, faz-se necessária a pressão de recalque.

Conforme Jorge (2010), a pressão de recalque é aplicada para manter constante o dimensional exigido no produto. Essa pressão de recalque envia até 15% a mais de massa, para manter sob pressão o polímero dentro da cavidade do molde, para que no retorno molecular (contração), o volume do produto, previamente estabelecido, não seja alterado.

Temperatura de injeção – é a temperatura na qual o material adquire capacidade de ser processado por injeção. Cada polímero tem uma faixa indicada de temperatura tabelada para o processamento, conforme a tabela 1.

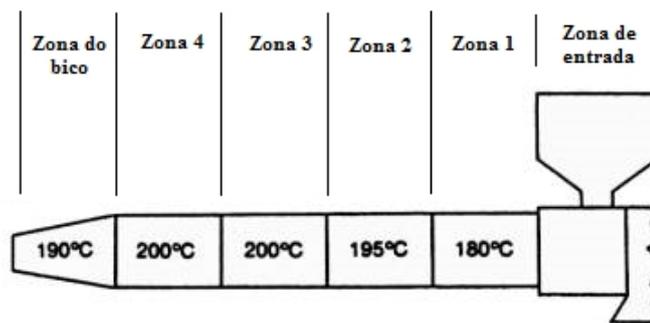


Figura 8: Zona de aquecimento no cilindro da máquina e valores típicos de temperaturas.
Fonte: Becker (2012)

As injetoras têm diversas zonas de aquecimento do cilindro que podem variar de acordo com cada matéria-prima utilizada, transformando a matéria-prima ao ponto de fusão ideal para o processamento do polímero dentro da cavidade do molde, mostrada na (Fig. 9).

Tabela 1 - Tabela de temperatura para os polímeros.
Fonte: Repian Projetando Soluções (2015).

Símbolo	Material	Peso esp. g/cm ³	Contração %	Temperatura de Injeção C°	Temperatura do Molde C°	Fabricantes
PP	Polipropileno	0,9	1,5 à 3	200 a 300	30 a 60	POLIBRASIL, ATOFINA, BRASKEM, IPIRANGA,
	Polipropileno Com 20% de Talco	1,06	1,4	180 a 230	50 a 70	
	Polipropileno Com 30% de Talco	1,13	1,2	180 a 230	50 a 70	
	Polipropileno Com 40% de Talco	1,24	1	180 a 230	50 a 70	
	Polipropileno Com 20% Com Micriesf. de Vidro	1	1,2	180 a 230	40 a 70	
Polipropileno Com 20% de Fobra de Vidro	1	0,2 à 1	210 a 240	40 a 70		
PE	Poliétileno de Alta Densidade	0,95	2 à 4	180 a 280	20 a 80	ATOFINA, BRASKEM, DOW, IPIRANGA, RIOPOL,
	Poliétileno de Baixa Densidade	0,93	1,5 à 3	180 a 250	20 a 60	
	Poliétileno de Média Densidade	0,94	1,75 à 3,5	180 a 265	30 a 70	
	Poliétileno com 20% de Fibra Curta	1,12	0,7	210 a 230	40 a 60	
	Poliétileno com 30% de Fibra Longa	1,16	0,3	240 a 270	40 a 60	
PS	Poliestireno	1,05	0,5	190 a 220	30 a 50	ATOFINA, BASF, DOW,
	Poliestireno Antichoque	1,05	0,5	200 a 230	40 a 70	
	Poliestireno Antutérmico	1,05	0,5	190 a 240	20 a 60	
	Poliestireno com 30% de Fibra de Vidro Longa	1,27	0,1	220 a 260	50 a 85	
PVC	Polidoreto de Vinila Rígido	1,4	0,5	180 a 200	20 a 60	ATOFINA, BRASKEM, DOW, IPIRANGA, RIOPOL,
	Polidoreto de Vinila Flexível		1,5 à 3	165 a 190	20 a 40	
PMMA	Poli(Metil Metacrilato)	1,18	0,5	180 a 220	40 a 100	BASF, PROGUIGEL,
ABS	Acrlonitrila-Butadieno-Estireno	1,04	0,5 à 0,7	190 a 230	40 a 80	GE, DOW, BASF,
SAN	Estireno-Acrlonitrila	1,08	0,5	180 a 210	60 a 80	BASF, DOW, LANXESS FÉNIX POL., BAYER
	Estireno-Acrlonitrila Com 30% de Fibra de Vidro	1,3	0,1	250 a 280	60 a 85	
PBT	Poli(Butileno Tereftalato)	1,31	1,2 à 2	230 a 250	60 a 100	DEGUSSA, DUPONT, BASF, GE, RHODIA,
	Poli(Butileno Tereftalato) Com 20% de Fibra de Vidro	1,47	0,6	230 a 250	60 a 100	
PC	Policarbonato	1,2	0,6	270 a 320	85 a 120	BAYER, DOW, KATEC, GE, POLICARBONATOS
	Policarbonato Com 20% de Fibra de Vidro	1,34	0,4	280 a 320	85 a 120	
	Policarbonato Com 30% de Fibra de Vidro	1,42	0,3	290 a 320	90 a 120	
POM	Poliacetal	1,41	2	200 a 220	80 a 120	DUPONT, BASF, KOLON, LG,
PPO	Polióxifenileno	1,06	0,5 à 0,7	235 a 315	100 a 120	RHODIA, TICONA, FORMOSA
PA	Poliâmida 6	1,14	1 à 2,5	250 a 270	30 a 60	RHODIA, MAZZAFERRO, LANXESS, DUPONT, BASF,
	Poliâmida 6 Com 30% de Fibra de Vidro	1,36	0,3	220 a 250	60 a 90	
	Poliâmida 6 Com 50% de Fibra de Vidro	1,56	0,2	230 a 260	70 a 100	
	Poliâmida 6.6	1,14	1,5 à 2,2	250 a 270	70 a 100	
	Poliâmida 6.6 Com 30% de Fibra de Vidro	1,37	0,3	250 a 280	80 a 100	
	Poliâmida 6.6 Com 50% de Fibra de Vidro	1,57	0,15	260 a 290	80 a 100	
	Poliâmida 12	1,02	1,2	210 a 240	50 a 80	
	Poliâmida 12 Com 30% de Fibra de Vidro	1,23	0,4	210 a 260	60 a 90	
CA	Ultramid A3K		1,2 à 1,3	285	70	RHODIA
	Ultramid A3K G5		0,6	290	40 a 90	
PPS	Fortron Com 40% de Fibra de Vidro	1,64	0,1 à 0,3	316	135 a 150	HOECHST
	Fortron Com 1140 / 1140 A4	1,64	0,3 à 0,6			
PEI	Polieterimide Ultem 1010	1,27	0,7			GE
	Polieterimide Ultem 1010 Com 10% de Fibra de Vidro	1,34	0,5 a 0,6	370	100	
	Polieterimide Ultem 1010 Com 20% de Fibra de Vidro	1,42	0,3 a 0,5			
	Polieterimide Ultem 1010 Com 30% de Fibra de Vidro	1,51	0,2 a 0,4			
	Polieterimide Ultem 1010 Com 40% de Fibra de Vidro	1,61	0,1 a 0,3			

Os valores desta tabela, foram recolhidas de várias publicações de fornecedores, recomendamos confirmar com seu fornecedor de matéria-prima o fator de contração específico para o seu material.

Temperatura do molde – é a temperatura da superfície do molde. Conforme Harada (2004), moldes com temperaturas altas nas superfícies de injeção deixam peças mais brilhantes e minimizam linhas de solda e marcas do material. Becker (2012) complementa que o bom controle da temperatura no molde é determinante, principalmente nos aspectos, acabamento da peça, tensões internas, contração e estabilidade dimensional. A uniformidade da temperatura no molde é crucial para materiais com alto grau de cristalinidade, porque dela depende a uniformidade da cristalização do material e, portanto, a estabilidade dimensional do produto.

Tempo de injeção – é o tempo que o material leva para sair do cilindro e se transferir para o molde. Está diretamente ligado à velocidade de injeção e ao tempo total de ciclo. Geralmente, a velocidade de injeção diminui gradativamente até o preenchimento total das cavidades (HARADA, 2004).

Segundo Jorge (2010), o tempo de preenchimento do molde envolve a alteração da velocidade de injeção e o nível de resistência do material à degradação, além dos tipos de saída de ar, entre outros fatores. Adotando-se velocidades de injeção muito altas, há aumento das taxas de cisalhamento, necessitando de altas pressões de injeção para preencher o molde. Abaixando-se muito a velocidade de injeção, tem-se uma menor taxa de cisalhamento, mas, por outro lado, a temperatura do fundido vai diminuir devido à troca de calor com o molde e crescimento da camada solidificada, necessitando então de altas pressões de injeção.

Tempo de recalque – é o tempo em que atua a pressão de recalque que serve para manter o volume de material injetado na cavidade. É utilizada para compensação da contração volumétrica do material polimérico, cuja mais importante função é a de possibilitar o balanceamento das pressões internas na cavidade. Há uma diferença entre a aplicação da pressão de recalque quando se trabalha com polímeros amorfos ou com alto grau de cristalinidade, afirma (JORGE, 2010).

Abreu (2012) comenta que o tempo de recalque é aplicado para sustentar o retorno do material, que já se encontra na cavidade do molde, até a sua solidificação e para empurrar material adicional para dentro da cavidade durante a sua contração, até finalizar o ponto de injeção.

Tempo de resfriamento – Segundo Araújo (2010), o tempo de resfriamento é o espaço de tempo que compreende o período entre o recalque e a extração da peça quando esta

adquire estabilidade térmica. A Figura 10 apresenta um gráfico que representa a temperatura de transição vítrea (T_g), a qual pode ser utilizada para determinar o momento de extração de uma peça.

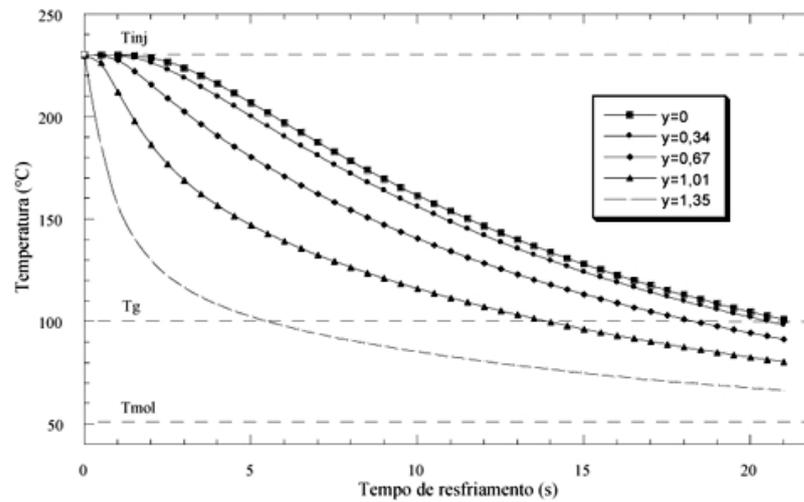


Figura 9: Gráfico simplificado de temperatura x tempo de resfriamento.
Fonte: Harada (2004)

Ahrens, Fernandes e Salmoria (2009) consideram que o tempo de resfriamento é a maior parcela dentre os tempos existentes em um ciclo completo de injeção. Mylla (1998) sugere que uma aproximação do tempo de resfriamento pode ser calculado pela seguinte equação 2:

$$t_c = \frac{S^2}{\alpha_{ef} \cdot \pi^2} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right) \quad (2)$$

Onde:

- t_c = Tempo de resfriamento (s);
- S = Espessura (mm);
- T_m = Temperatura de injeção (°C);
- T_w = Temperatura do molde (°C);
- T_e = Temperatura de extração (°C);
- α_{ef} = Difusividade térmica efetiva (mm^2/s).

Volume de dosagem – é o volume necessário para prover o material, a fim de garantir a injeção, ou seja, é o recalque de massa no processo de injeção. O material é transportado, plastificado e compactado até atingir um volume determinado (ARAÚJO, 2010).

Segundo Perraro (2007), o material é transportado do funil através de uma rosca que gira dentro do cilindro onde o material é compactado e fundido. O volume de material acumulado em frente da rosca é chamado de volume de dosagem, e este parâmetro é ajustado de acordo com cada molde e material.

2.7 Simulação do processo de injeção.

Os sistemas computacionais para simulação de processos de injeção são constantemente aperfeiçoados, permitindo a obtenção de resultados mais precisos, reduzindo significativamente os custos de desenvolvimento de produto e o tempo do seu lançamento. O processamento do plástico utilizado no passado permite lembrar geometrias bem simples, com poucos detalhes. Com a evolução dos materiais plásticos e aplicações mais exigentes, o campo mercadológico, conseqüentemente, cresceu, possibilitando o lançamento de novas máquinas, instrumentos de medidas, periféricos e renovando dia a dia o processo de fabricação. Com tantas evoluções e variáveis, sem a utilização dos recursos apropriados, o risco de desenvolver um produto plástico inviável pelo alto custo de erros é grande.

Para Torres (2007), as condições sobre as quais uma peça é moldada têm um efeito significativo na sua qualidade, incluindo acabamento superficial, estabilidade dimensional e propriedades mecânicas adequadas. A melhoria contínua em novos polímeros e a demanda por peças de melhor qualidade têm forçado os técnicos a melhorar a eficiência do processo de injeção. Atualmente existem diversas ferramentas comerciais para simulação do processo de injeção. Estas ferramentas são também conhecidas, genericamente, como sistemas CAE, que significa engenharia auxiliada por computador. Ainda, o mesmo autor (TORRES, 2007) afirma que, usando simulação computacional, várias combinações de parâmetros, design, materiais e processamento podem ser testadas rapidamente e de forma econômica. Este processo pode eliminar erros de projeto, prever falhas por condições de processamento inadequadas e fornecer informações sobre a forma de transformação e variáveis que afetam a qualidade, o custo e o desempenho do produto.

A simulação do processo de injeção é uma ferramenta que tem um peso fundamental em qualquer projeto que pretende ser competitivo. Por meio dela, pode-se obter uma visão global do molde e do comportamento do processo, antes de sua concepção e execução, atingindo um molde otimizado e uma configuração inicial mais adequada no começo do projeto, como também a conveniência de um material sobre outros. Com a aplicação dessas

ferramentas, no final, tudo converge para a redução de custos e tempos de lançamento de produto mais curtos.

Torres (2007) aponta que, geralmente, os softwares comerciais de simulação computacional do processo de injeção estão disponíveis em módulos, podendo-se adquirir somente aqueles que melhor atenderem às necessidades de informações para cada projeto. Apesar de haver diferenciação de estrutura entre diversos softwares oferecidos no mercado, pode-se considerar que estão contidos, na maioria dos simuladores, módulos com os seguintes objetivos: preenchimento, recalque, orientação de fibras, resfriamentos, empenamento, sobre injeção, dentre outros.

O mesmo autor (TORRES, 2007) orienta que também é possível dimensionar o porte de máquina injetora a ser utilizada para a produção da peça, bem como decidir a quantidade de cavidades no molde. Conforme a Figura 12, simulação do processo de injeção, é possível ter uma visão do comportamento que não é visível. Por meio dela, pode-se avaliar a eficiência do sistema de refrigeração projetado, identificar possíveis problemas e indicar melhorias antes de se realizar investimentos na construção de moldes e produção de amostras.

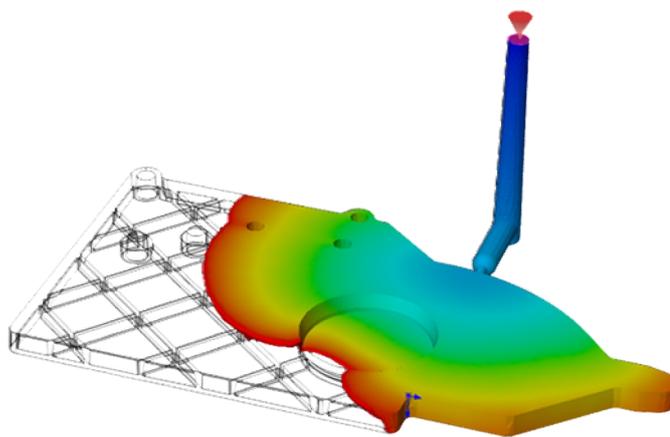


Figura 10: Simulação do Processo de Injeção.
Fonte: PortalCad.

O projeto completo de um molde e suas parametrizações, no final da década de 70, levava, em média, um ano de estudo, confecção do projeto completo do molde e de suas parametrizações. Com o início do CAD, em meados da década de 80, esse tempo começou a diminuir. Com a evolução dos programas computacionais, tais como o *SolidWorks*, conseguem-se projetar um molde completo em aproximadamente 45 dias, e com a ferramenta *SolidWorks Plastics*, conseguem-se os parâmetros necessários para o processo de injeção, tendo em vista o desenho do produto já concluído.

Simulação de preenchimento - Simula o comportamento do polímero fundido durante a fase de injeção, ou seja, o preenchimento do molde no processo de injeção. Por meio da simulação, preveem-se as linhas de solda, as saídas de gases, a pressão de injeção, a taxa de cisalhamento, a tensão de cisalhamento, a força de fechamento, a temperatura da frente de fluxo, a camada congelada, o tempo de injeção e o tempo de resfriamento. Através desse tipo de análise é possível aperfeiçoar a posição do ponto de injeção, as condições de processo e avaliar possíveis defeitos de mau preenchimento da peça e degradação de matéria-prima. É possível criar sistemas de alimentação para moldes de uma ou várias cavidades e balancear estes canais de forma a garantir a entrada uniforme do material no molde. Esse processo é demonstrado na figura 13.

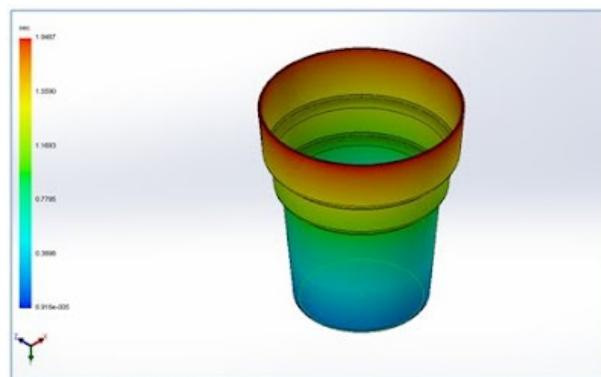


Figura 11: Exemplo de simulação do tempo de preenchimento.
Fonte: *SolidWorks Brasil*.

Simulação de Recalque - Simula o comportamento do polímero fundido e a transferência de calor durante a fase de preenchimento e compactação do processo de injeção. Prevê a pressão, a temperatura, a densidade, a contração volumétrica, a distribuição da taxa de solidificação e a força de fechamento, avaliando a qualidade do produto final e o nível de tensões residuais. Uma análise de contração dimensional é exposta na Figura 14, onde se tem a variação da contração identificada pelo gradiente de cores.

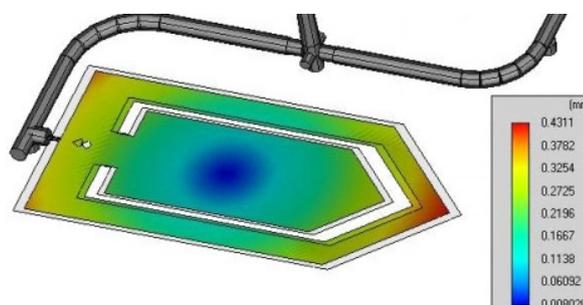


Figura 12: Exemplo de simulação de contração dimensional.
Fonte: *Torres (2007)*.

Simulação de Resfriamento - Simula a transferência de calor do molde durante a fase de resfriamento do processo de injeção. Prevê o melhor tempo de resfriamento, assim como a disposição e tamanho dos canais de resfriamento, para que a redução da temperatura seja rápida e uniforme. A análise do resfriamento leva em consideração a distribuição dos canais, as suas dimensões e o fluido usado, bem como a sua vazão e temperatura de entrada. Nesse tipo de análise pode-se obter informações tais como: a distribuição de temperatura na peça e no molde, o aumento de temperatura do fluido, a pressão necessária para circulação do fluido de resfriamento, a vazão ao longo dos canais de resfriamento, o número de Reynolds e o tempo de congelamento da peça (Fig. 15).

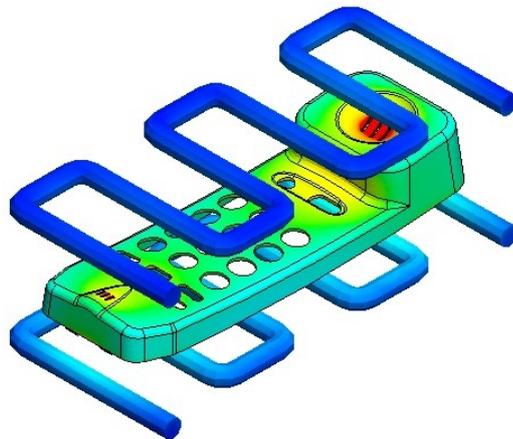


Figura 13: Exemplo de simulação de resfriamento.
Fonte: *SolidWorks Brasil*.

Simulação de Empenamento - Simula o empenamento e a estabilidade dimensional da peça injetada, após a extração. Prevê o empenamento das peças injetadas, de forma a determinar, antecipadamente, a causa dos defeitos e fornecer dados importantes para o projeto da peça, do molde, a seleção do material e as melhores condições de moldagem. Esta análise permite o desenvolvimento de um projeto de moldes com contrações adequadas do produto nas diferentes direções, evitando a necessidade de ajustes nas medidas, conforme ilustra a Figura 16.

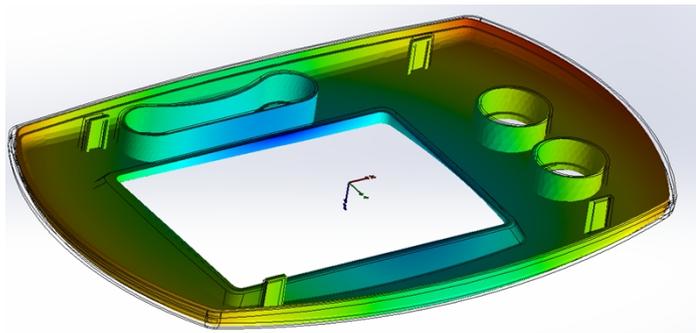


Figura 14: Exemplo de simulação de empenamento.

Fonte: *SolidWorks Brasil*.

Simulação de Orientação de Fibras (Malha) - Tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas e estruturais das peças plásticas injetadas. Essa orientação permite visualizar a variação no alinhamento da malha ao longo da espessura da peça, apontando previamente os efeitos da orientação, sobre a resistência mecânica e térmica (Fig. 15).

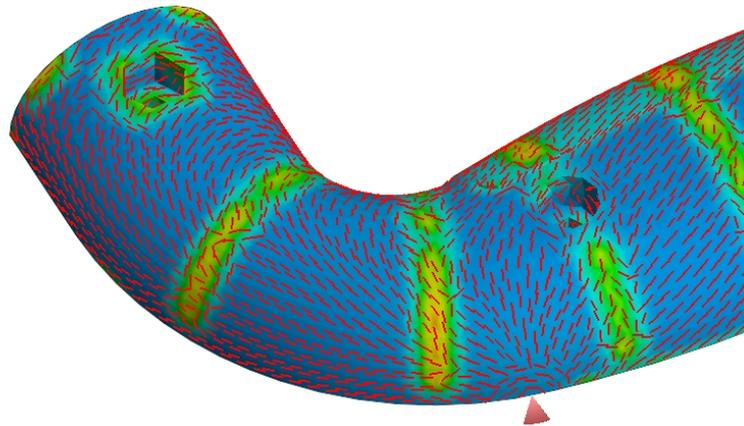


Figura 15: Exemplo de malha na simulação.
Fonte: *Computer Aided Technology (CATI)*

2.8 Instrumentação de Moldes de Injeção.

Souza (2013) comenta que, em um primeiro momento, a indústria transformadora de materiais plásticos busca a redução do ciclo no processo de injeção e, assim, a redução de custos e tempos. Porém, esta redução do tempo do ciclo não pode afetar as propriedades do produto injetado. Conhecer a reologia do material e o comportamento físico-químico sofridos no processo de injeção é fundamental para esta otimização. Entretanto, este conhecimento ainda não é trivial, e a dificuldade está em se obter estas informações no interior do molde, durante da injeção. Desta forma, a instrumentação de um molde permite conhecer o processo de injeção, empregando sensores de temperatura e pressão. Com as informações destes sensores é possível desenvolver estudos científicos e tecnológicos, envolvendo a otimização do ciclo de injeção, da pressão e da temperatura.

De acordo com Becker (2012), a instrumentação do molde demanda considerações adicionais no projeto, para inclusão dos sensores (Fig. 16), prevendo os pontos corretos para monitoramento. A instrumentação permite interagir com programas de supervisão das

máquinas e programa de supervisão produtiva, permitindo a troca de informações em tempo real e correções de possíveis problemas. Normalmente, os principais sensores utilizados no molde de injeção controlam a pressão e a temperatura na cavidade do molde.



Figura 16: Demonstrativo de sensores num molde acadêmico.
Fonte: Kistler (2015).

2.8.1 Monitoramento da pressão na cavidade.

Becker (2012) afirma que, no processo de injeção, a pressão na cavidade é um parâmetro para avaliar a qualidade da peça e para regular as tolerâncias e dimensões, como mostra a Figura 17, evidenciando o controle da pressão para a produção de peças com tolerâncias apertadas. Variações no caminho de fluxo são diretamente relacionadas com a pressão na cavidade, por esse motivo, a pressão na cavidade é parâmetro para a qualidade final das peças.

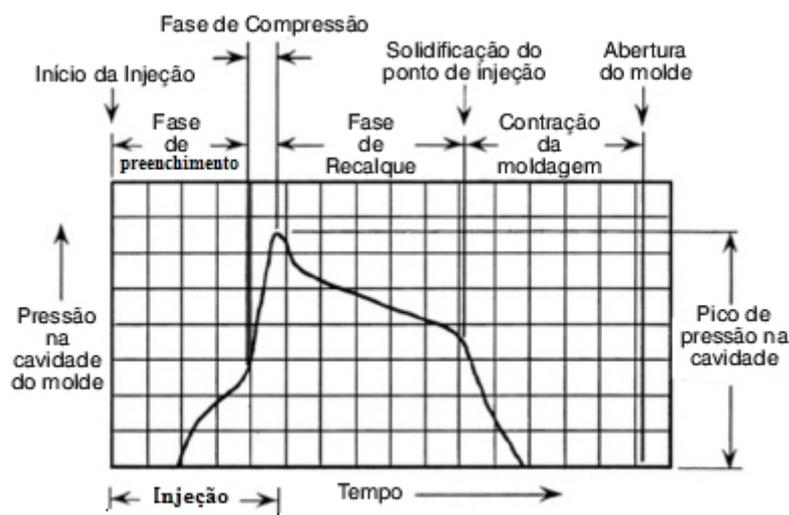


Figura 17: Exemplo de variação da pressão durante o processo de injeção.
Fonte: <http://www.moldesinjecao plasticos.com.br/>

Ainda, o mesmo autor (BECKER, 2012) cita que em um processo típico de injeção há várias etapas da pressão dentro da cavidade, tais como: pressão de injeção, pressão dentro da cavidade, pressão máxima, pressão residual e pressão do recalque. Souza (2013) informa que a pressão na cavidade e sua repetitividade influenciam a qualidade, especialmente em sua massa, estabilidade dimensional, propriedades mecânicas e qualidade superficial. Propõe que a pressão da cavidade pode manter a alta qualidade e as características do produto, além de ajudar o processo de injeção.

Sensores auxiliam a medição, de forma direta ou indireta, e a pressão na cavidade. Conforme orientação dos fabricantes, durante a medição direta, o sensor entra em contato com o polímero fundido dentro da cavidade do molde e capta sua pressão naquele ponto localizado. Nas medições diretas, a instalação dos sensores pode marcar a superfície da peça, pois a face do sensor é colocada em contato com o polímero fundido dentro da cavidade do molde. Para tanto, o molde é usinado para acomodar o sensor. No projeto do molde deve ser avaliado o posicionamento dos sensores de pressão para não alterar o dimensional do produto injetado e não interferir no funcionamento dos canais de refrigeração e pinos extratores. Na forma indireta, a pressão é medida através dos sensores localizados atrás dos pinos extratores na cavidade do molde, os quais informam à pressão que o pino extrator está sofrendo naquele momento. A leitura direta é sempre preferida, pois a indireta é mais suscetível a erros de leitura dos sensores.

2.8.2 Monitoramento da temperatura na cavidade.

Araújo (2010) aponta, como mostra a Figura 18, que a temperatura na cavidade resulta de uma somatória de parâmetros, tais como: temperatura de injeção, temperatura do molde, modelo de resfriamento e tipo de fluido de resfriamento.

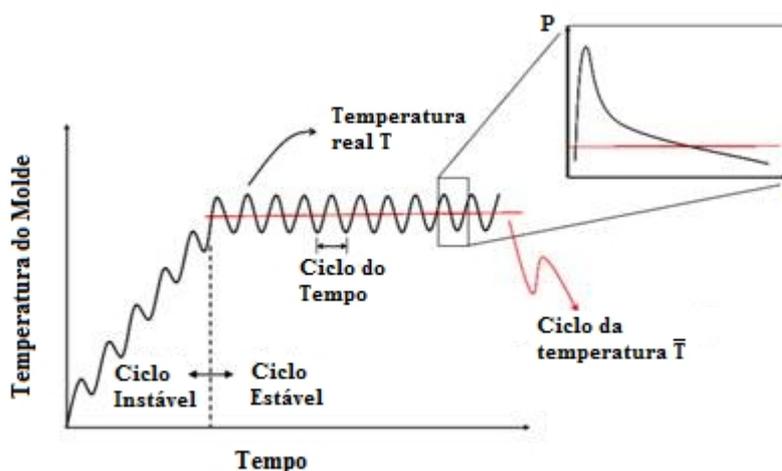


Figura 18: Variação da temperatura de injeção durante o processamento.
Fonte: Araújo (2010)

Segundo Becker (2012), a temperatura é um parâmetro importante que influencia o processo de injeção. O estudo da temperatura em peças injetadas é fundamental para um melhor entendimento de fenômenos complicados, como a transferência de calor e orientação molecular, de acordo com o autor. A otimização de processos de injeção exige que se determinem os valores de temperatura dentro da cavidade, uma vez que podem surgir variações de temperaturas ocasionadas por elementos externos ao processo de injeção, tais como funil de alimentação e choque térmico que o material polimérico receberá ao chegar ao molde. Becker (2012) conclui ainda que muitas variáveis influenciam a temperatura no interior da cavidade do molde e que quando for encontrada uma forma adequada de mensurar a temperatura do polímero injetado dentro do molde, poderá se ter melhor qualidade no produto injetado.

Segundo Becker, et al (2013), durante o preenchimento da cavidade do molde ocorrem diferentes fenômenos com as camadas do polímero fundido, ocasionando diferentes temperaturas, gerando o que é conhecido como fluxo laminar. Essas camadas formam diferentes níveis de viscosidade, influenciando a reologia do polímero. Com o aumento das exigências de projeto, buscando formas orgânicas para os produtos as quais contêm formas geométricas complexas, as ferramentas computacionais CAD/CAE/CAM vêm possibilitando realizações de simulações do produto a ser injetado, proporcionando parâmetros do processo

de injeção daquela peça específica. A simulação auxilia na diminuição de futuros problemas de moldagem causados pela inadequada fabricação do molde, possibilitando minimizar os custos desnecessários de retrabalho do molde e melhorando a qualidade do produto injetado.

2.9 Defeitos em Peças Injetadas (Linha de Solda)

Conforme Pfeifer (2013), as linhas de solda surgem no processo de injeção, no preenchimento da cavidade do molde quando dois pontos de fluxos se encontram. Isso ocorre quando há separação do fluxo polimérico e, em algum ponto da cavidade, há o encontro do fluxo polimérico, ocorrendo uma solidificação sem homogeneidade estrutural molecular, como mostra a Figura 19.

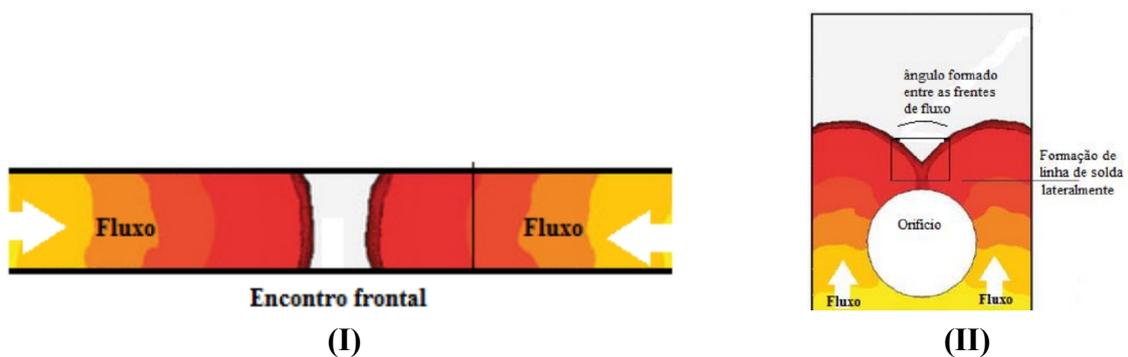


Figura 19: Formações típicas de linha de solda (I) fria e (II) quente.
Fonte: Pfeifer (2013).

As mudanças nas propriedades ao longo da região de linha de solda dependem de quão homogênea é a união das frentes de fluxo. A força que mais atua na união das frentes de fluxo são a de Van-der-Waals e o emaranhamento das cadeias que ocorre por difusão atômica.

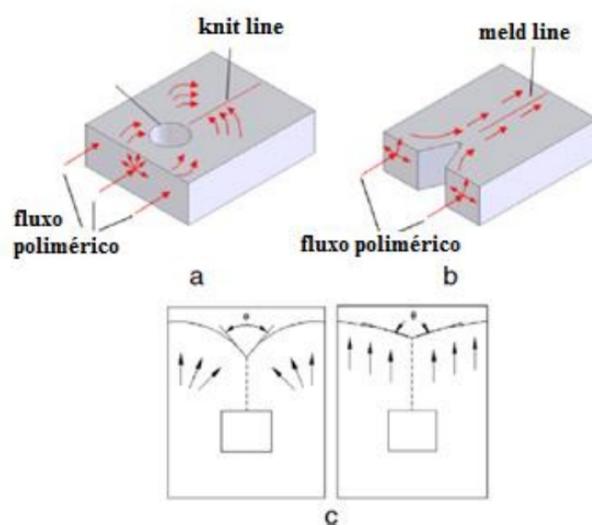


Figura 20: Esquema de formação de linhas de solda quente.
(a) Linha união (*knitline*), (b) Linha de combinação (*meldline*) e (c) ângulo de encontro de *knitline* e *meldline* respectivamente.
Fonte: Pfeifer (2013).

A formação de concentradores de tensão, chamada também de entalhe em “V”, está relacionada com a camada congelada, resultante da fase de preenchimento da cavidade do molde no processo de injeção. A camada congelada é a região que está em contato com a parede da cavidade, decorrente do resfriamento provocado pela troca térmica entre o fluxo da resina polimérica e a parede, onde o movimento deste é restringido. Entre as camadas congeladas, forma-se um canal de fluxo, onde a resina flui e preenche a cavidade do molde. A formação de uma linha de solda fria gera um entalhe em “V”, como pode ser visto na Figura 21.

De acordo com Pfeifer (2013), há um grande número de fatores que afetam a resistência e a estética das peças moldadas por injeção. Entre os fatores que influenciam a formação de linhas de solda em moldes de aço estão: tipo de resina polimérica, espessura da peça, geometria da cavidade do molde, número e localização dos pontos de injeção, modificadores de impacto na resina, aditivos que volatilizam durante o preenchimento do molde, reforços, condições do processo de moldagem e lubrificantes pulverizados sobre a cavidade do molde. As linhas de solda também causam irregularidades na aparência da peça moldada por injeção, tornando-a mais propensa à falha.

Capítulo III

GEOMETRIA DE TESTE, PROJETO E FABRICAÇÃO DO MOLDE.

3.1 Introdução

Neste capítulo, serão abordados os procedimentos para especificação, projeto e fabricação do molde para teste, os quais foram projetados através de uma lista de objetivos que o produto deve atender. O objetivo principal desse capítulo é explanar como foi projetado o molde de injeção. Para isso, foi preciso estabelecer o método abaixo mostrado para resultar na geometria do corpo de prova, desenvolver o projeto detalhado do molde e fabricar o molde para o processo de injeção do corpo de prova.

De maneira a obter um melhor entendimento, foi elaborado um plano de projeto para as avaliações a serem desenvolvidas com esta pesquisa. Este plano de projeto constituiu-se em:

- Processo de desenvolvimento da geometria para teste;
- Processo, projeto e fabricação do molde de injeção;

3.2. Processo de Desenvolvimento da Geometria para Teste.

A partir da determinação do projeto, identificaram-se as necessidades e limitações de cada etapa. O projeto da geometria de teste seguiu, então, uma ordem típica de seleção de material, definição e representação da geometria em sistema CAD e fabricação do protótipo. A simulação computacional da moldagem, através de um sistema CAE, foi a técnica que se

adotou para auxiliar o processo. Independentemente do nível tecnológico e da complexidade, o ciclo de desenvolvimento de um componente injetado é bastante longo e requer a aplicação de várias áreas do conhecimento. As etapas de definição da geometria, seleção do material, projeto e fabricação do molde e produção do componente são tratadas em maiores detalhes nas seções seguintes, sob o enfoque do grau de inter-relação que existe entre estas etapas.

No início deste estudo, avaliou-se o processo de preenchimento da cavidade do molde. Precisava-se uma geometria que possibilitasse estudar a entrada de frente do fluxo e acrescentar um dos principais defeitos comuns no processo de injeção: a linha de solda; promovendo um obstáculo, dividindo o fluxo inicial e se juntando no final do fluxo novamente.

Utilizando embasamentos em diversas referências, começou-se a definir a geometria de teste, buscando reorganizar as informações até chegar numa geometria que atendesse aos requisitos do objetivo principal e específico desta dissertação de mestrado. Procurou-se utilizar, no primeiro momento, um produto de forma e geometria simples e espessura de parede uniforme e constante. A Figura 24 apresenta o modelo geométrico para o teste que foi originado deste estudo.

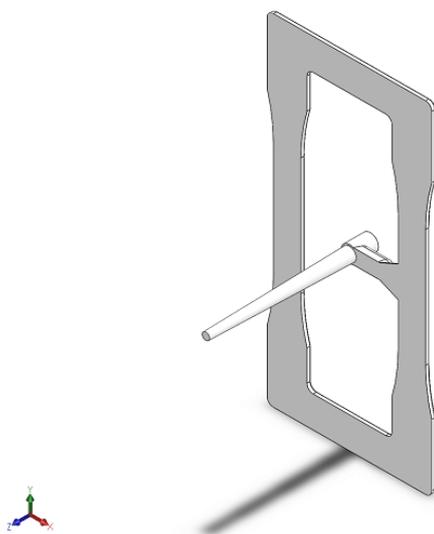


Figura 21: Geometria escolhida para teste.

Linhas de solda se formam na junção de duas frentes de fluxo, podendo provocar problemas estruturais, o que faz com que a peça apresente um aspecto inaceitável. Linhas de solda não podem ser evitadas quando o fluxo frontal é dividido. Assim, as condições de processamento ajudam a determinar a qualidade das linhas de solda. Sua resistência é

influenciada pela temperatura do polímero e a pressão exercida no ponto da solda, as quais devem ser mantidas até que a peça seja totalmente resfriada.

Como a resistência é influenciada pela temperatura e pressão dentro da cavidade do molde, a geometria de teste permite comparar a resistência no ponto de entrada da cavidade com a resistência da linha de solda que se forma no lado oposto. Essa comparação pode ser realizada através do ensaio de tração, pois ele é o mais utilizado para avaliar as propriedades mecânicas. Com o ensaio de tração, consegue-se colher dados importantes para o controle de qualidade e homologação ou rejeição de materiais poliméricos.

A globalização e a concorrência vêm reduzindo os custos no processo. Produtos como eletroeletrônicos vêm sofrendo alterações, principalmente na diminuição da espessura e massa dos gabinetes injetados. Para atender a essa demanda do mercado, trabalhou-se com espessura uniforme de 2 mm na geometria de teste.

A norma ASTM D638 apresenta cinco tipos de corpos de provas diferentes, para materiais poliméricos rígidos e semirrígidos. Para atender a todas as especificações e restrições dos objetivos, utilizou-se como base o corpo de prova padrão ASTM D638 do tipo I na geometria de teste (Figura 25).

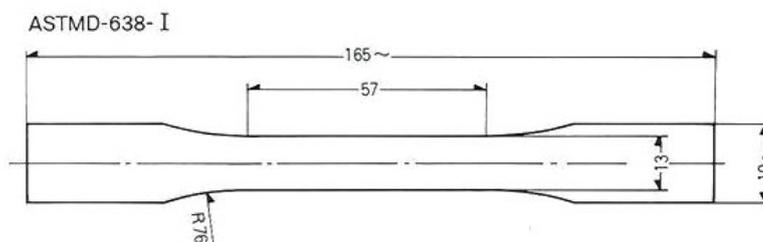


Figura 22: Dimensionamento padrão ASTM D638 Tipo I.

3.3. Processo, Projeto e Fabricação do Molde de Injeção.

Os produtos plásticos injetados constituem uma categoria especial de produtos industriais cujo desenvolvimento é, geralmente, complexo, devido a diversos fatores, como a estrutura fragmentada do setor, informações multidisciplinares e interdisciplinares. Além disso, deve ser realizado levando em conta, informações estabelecidas com base em regras e recomendações.

De acordo com o estudo comparativo das atividades envolvidas no processo de projeto de moldes de injeção, com relação a algumas metodologias de desenvolvimento de produtos, as atividades do processo de desenvolvimento do projeto de moldes foram divididas. Projeto do molde, cavidade, molde intercambiável, seleção da família, máquina injetora disponível, canais de resfriamento, canais de distribuição e extração do produto.

O projeto do molde teve como base a geometria da peça. Para facilitar o trabalho e conseguir ganhar tempo para a confecção do molde, decidiu-se pela utilização do porta molde padronizado. Com base na geometria do produto já definida, foi necessária a utilização de uma porta molde padrão com área útil de aproximadamente 210 mm de comprimento por 150 mm de largura. Utilizando-se o sistema padronizado de porta molde da MDL-Brasil, avaliando seu catálogo e atendendo à necessidade, foi possível concluir que a melhor composição seria o porta molde padrão 30x30, disponibilizando uma área útil de 270 mm de comprimento por 134 mm de largura, como se pode verificar na Figura 23.

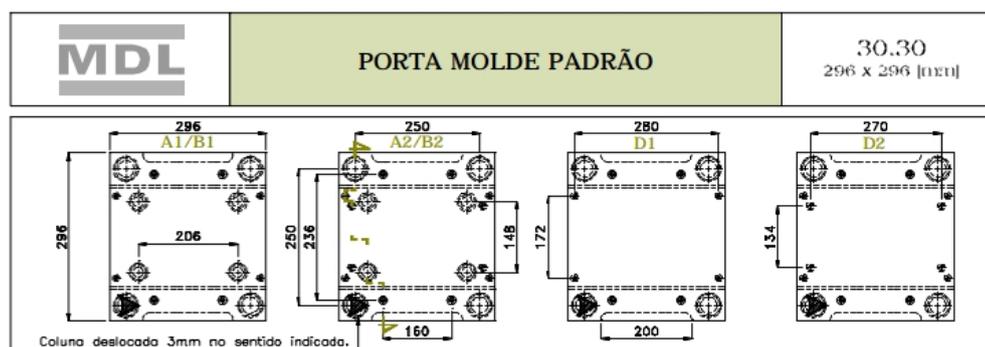


Figura 23: Demonstrativo do porta molde 30x30.
Fonte: Catálogo Porta Molde MDL-Brasil Pág. 16.

A MDL-Brasil doou o porta molde para o IFSC. No processo de adaptação, o molde foi transformado numa ferramenta intercambiável com cavidades insertadas. Para essa transformação, foi preciso definir a espessura da cavidade inferior para alojar no porta cavidade inferior. Na cavidade inferior definiu-se uma espessura de 36 mm, pois nela era necessário alojar os sensores de pressão e temperatura. Com essa especificação, dimensionou-se a espessura de 60 mm para o porta cavidade inferior. Com a cavidade superior alojando a bucha de injeção, foi preciso manter uma espessura de 32 mm e dimensionar o porta cavidade superior com 46 mm. Ao especificar o curso de extração do produto e cuidando para deixá-lo intercambiável, definiu-se um curso de extração de 30 mm. Com todas essas definições, o porta molde ficou dimensionado.

Com a definição do porta molde e a cavidade do produto a ser injetado, começou-se a seleção da família do molde. O principal ponto foi recolher informação da máquina injetora disponível para o nosso processo, no qual foi utilizada uma máquina injetora Arburg 370 E do IFSC-Florianópolis.

Como visto no capítulo anterior, a temperatura do molde é fundamental para o processo de injeção. Para isso, criou-se um sistema de resfriamento uniforme, com diâmetro da passagem da água com 8 mm, deixando um afastamento de 18 mm do centro do canal da cavidade. Para a uniformidade da temperatura, definiram-se duas entradas e duas saídas, uma em cada lado da cavidade, conforme se pode verificar na Figura 24.

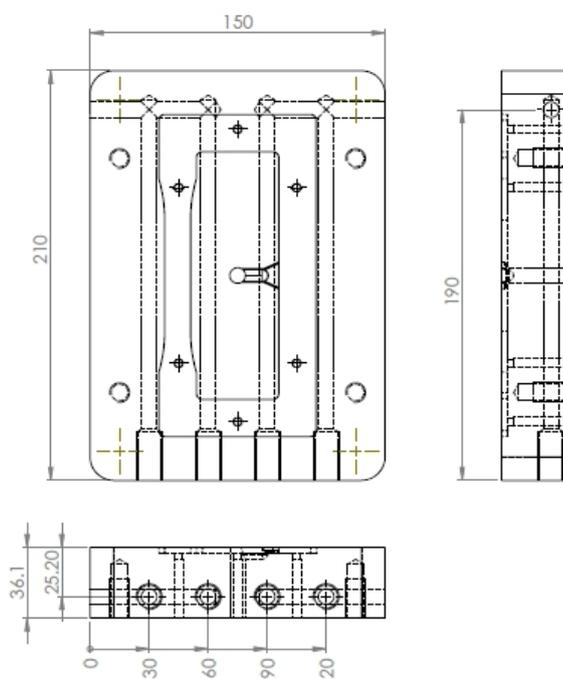


Figura 24: Desenho evidenciando os canais de resfriamento.

Pensando ainda no processo de injeção do molde do corpo de prova em teste, foi preciso definir ainda o canal de injeção. Optou-se pelo canal de injeção direta para diminuir a perda de calor do polímero fundido durante o percurso. Para reter o canal de distribuição e retirar de dentro do canal da bucha, definiu-se a retenção em Z, o que facilitou a manutenção e gerou praticidade. Conforme o fluxo vai percorrendo, passa pelo canal de distribuição, onde foi utilizado canal trapezoidal modificado, com diâmetro hidráulico de 6 mm e ângulo de 15°. No que se refere ao tipo de canal de entrada, escolheu-se o canal de entrada em leque, pois este proporciona um melhor preenchimento da cavidade com o polímero fundido, evitando o efeito de esguichamento.

Pensando em não haver interferência na parte do produto a ser estudado, um ponto importante foi a localização dos extratores, onde se utilizaram oito pinos com diâmetro de 4 mm, quatro pinos de retorno das placas extratoras com diâmetro de 4 mm e um pino na região central com diâmetro de 8 mm. Além dos pinos extratores em suas localizações, foi necessário definir a localização dos sensores. Com o objetivo de deixar o molde intercambiável, posicionou-se um sensor de pressão e temperatura na entrada de injeção e outro no ponto que formaria a linha de solda. O sensor de pressão que foi adquirido possui diâmetro de 4 mm e o sensor de temperatura possui diâmetro de 1 mm, prevenindo a não perda do processo de usinabilidade na cavidade inferior. Após análise, decidiu-se alojar o sensor de temperatura dentro de um postiço especial. Esse postiço necessitou de micro usinagem de alta tolerância, serviço que foi terceirizado com a Ferramentaria Btomec. A Figura 25 mostra a localização dos postiços, e a Figura 26 mostra a fotografia do postiço para sensor.

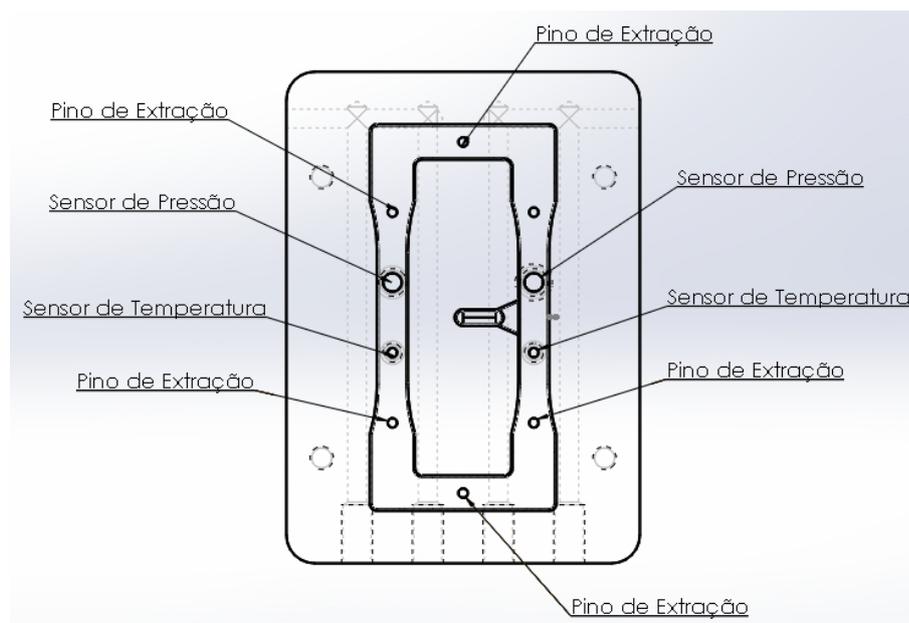


Figura 25: Localização dos sensores.



Figura 26: Fotografia do postiço para sensor de temperatura.

A Figura 27 ilustra, em perspectiva, o modelo 3D em CAD do molde projetado, apresentando as partes móvel e fixa.

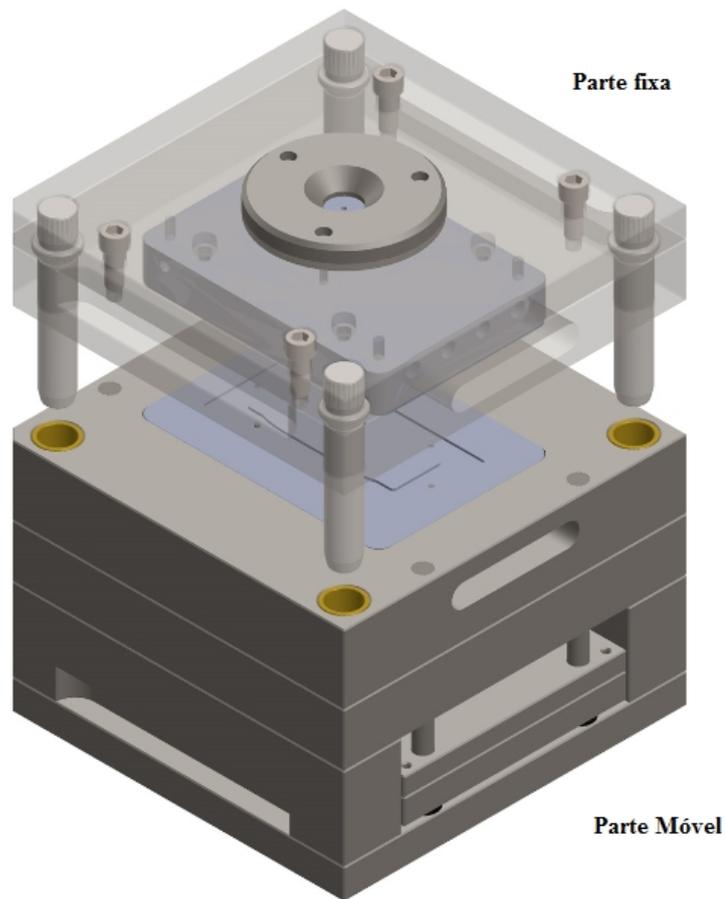


Figura 27: Representação em CAD do molde montado.

As primeiras peças usinadas foram os bolsões do porta cavidade, tanto superior, quanto ao inferior. As cavidades foram esquadrejadas, retificadas e seus furos de resfriamento e extração foram usinados. Ajustaram-se as cavidades no bolsão do porta cavidade e, na sequência, deu-se início à usinagem do perfil da geometria de teste, conforme mostra a Figura 28.

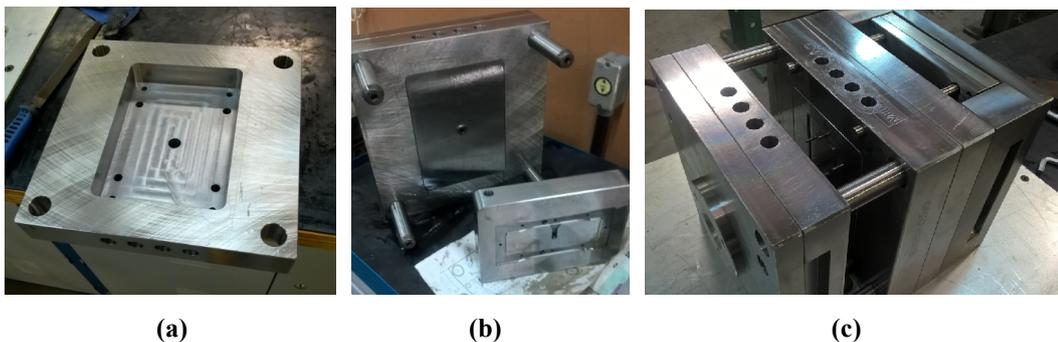


Figura 28: Molde em processo de fabricação.

(a) Porta cavidade superior, (b) Parte fixa e cavidade inferior e (c) Molde com montagem incompleta.

Conforme pode ser visto na Figura 29, houve necessidade de realizar diversas furações de extração da placa porta cavidade inferior e placa suporte. Com o objetivo de deixar o molde intercambiável, criou-se uma malha de furações com diâmetro de 4,5 mm e com espaço entre eles de 15 mm.



Figura 29: Placa Suporte em processamento de furação.

Depois de terminado o processo de fabricação do porta cavidades, realizou-se o esquadreamento e furação dos canais de resfriamento na cavidade. Após, iniciou-se o ajuste de alojamento, encaixando com precisão a cavidade dentro do porta cavidade, tanto para a parte superior como para a inferior. Este processo levou bastante tempo, pois esse ajuste foi realizado manualmente, para não ocorrer nenhum problema de desencontro entre as cavidades.

Na sequência foi criado o programa CNC para usinagem da cavidade. A Figura 30 mostra como ficou o resultado da geometria do corpo de prova na cavidade inferior que posteriormente foi polida.

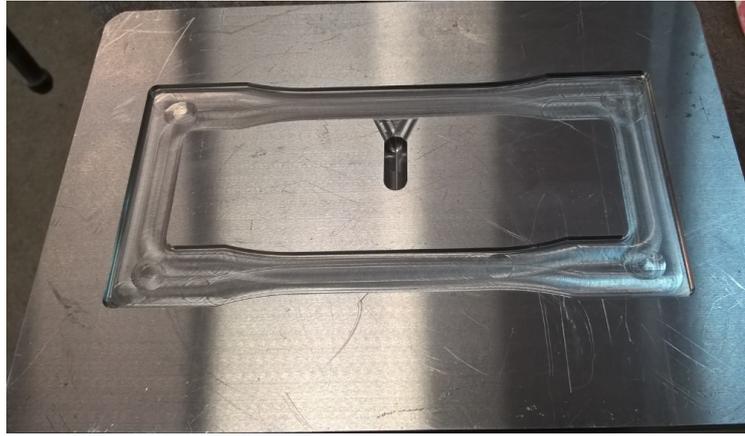


Figura 30: Geometria usinada na cavidade inferior, sem polimento.

Com toda a usinagem pronta e ajustes realizados, executou-se a montagem do molde. Para o resfriamento, foram montados conectores de água. Um ponto crítico foi o alojamento dos sensores cujas tolerâncias bem apertadas poderiam gerar erros de montagem. Com o sistema de posição criado para alojar os sensores, diminuiu-se significativamente essa preocupação. A Figura 31 mostra o molde concluído e montado.



Figura 31: Molde de injeção da geometria.

4.1 Introdução

Nesta fase, serão abordados os materiais e métodos utilizados na realização dos testes de moldagem e avaliação do molde instrumentado. No aspecto macro (Figura 23), apresenta-se o material selecionado, seu tipo e suas propriedades dentro do processo de injeção plástica. Para a definição do estudo de moldagem, foi desenvolvido um planejamento fatorial para determinarem-se as condições de trabalho. Para monitorar os parâmetros de injeção, utilizaram-se sensores de pressão e temperatura dentro da cavidade do molde no qual identificou-se o modelo, fornecedor e suas características essenciais. Monitorando todas as condições criadas através do planejamento fatorial, recolheram-se os dados de pressão através da interface da máquina injetora. Quanto ao sensor de temperatura, os dados foram salvos através de um supervisor da National Instruments. A geometria de teste foi simulada no software *SolidWorks Plastics* 2016 para comparação dos resultados obtidos nas injeções. Nela, utilizaram-se as mesmas condições do planejamento fatorial da injeção plástica. Para a simulação, foi necessário definir o tipo de malha e seus elementos, para que as análises de preenchimento, comutação, recalque e tempo de resfriamento fossem realizadas. Para avaliar o molde, realizou-se a medição da massa e ensaios de tração dos corpos de prova injetados no mesmo. Obtidos da geometria de teste, separando-a em dois corpos de provas que foram identificados como Corpo de prova EI (Entrada de Injeção) e Corpo de prova LS (Linha de Solda), tendo assim, dois corpos de provas para cada condição utilizada no planejamento fatorial. Com o corpo de prova já retrabalhado, realizou-se o ensaio de tração para avaliação da resistência mecânica através da tensão máxima e módulo de elasticidade.

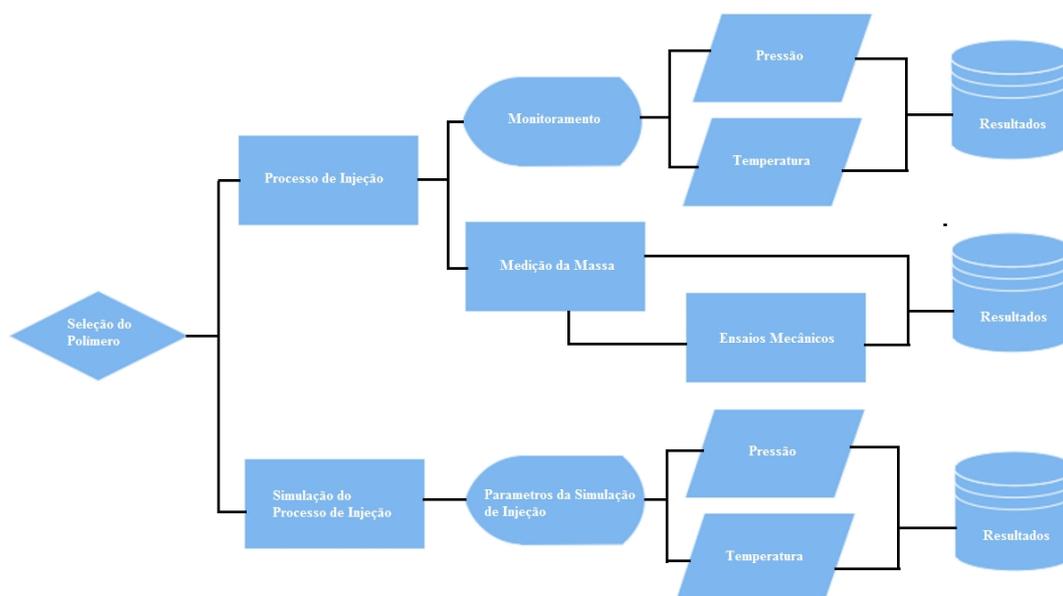


Figura 32: Molde de injeção da geometria.

4.2 Seleção do polímero.

Para a avaliação da geometria e a instrumentação do molde, utilizou-se o polipropileno (PP), *grade* H 503, produzido pela Braskem. De acordo com o fornecedor, trata-se de uma resina de PP de baixo índice de fluidez, aditivada para uso geral, indicada para moldagem por injeção de tampas *flip-top* e com dobradiças integradas e peças de parede espessa. A tabela 2 apresenta as principais propriedades do material (BRASKEM, 2015).

Tabela 2 – Propriedade do polímero H503.

Propriedade de Controle			
	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230° C/2,16 kg)	D 1238	g/10 min	3,5
Propriedades Típicas			
	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade	D792	g/cm ³	0,905
Módulo de Flexão Secante a 1%	D790	MPa	1300
Resistência à Tração no Escoamento	D638	MPa	35
Alongamento no Escoamento	D638	%	11
Dureza Rockwell	D785	HR	97
Resistência ao Impacto Izod a 23° C	D256	J/m	30
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	D648	° C	98
Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 MPa	D648	° C	55
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	D1525	° C	155

4.3 Injeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram injetados em uma injetora ARBURG 370E 600 (EUROMAP 170, com rosca de 30 mm). Como a folha de dados do produto não fornece informações acerca das condições de injeção, realizou-se um experimento preliminar para determinação dos parâmetros de injeção. Com base neste experimento inicial, foi criado um planejamento fatorial completo 4^2 , apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Resumo do planejamento fatorial estabelecido.

Fatores experimentais	Baixo	Alto
Vazão de injeção (cm ³ /s)	20	40
Pressão de recalque (%)	40	60
Tempo de recalque (s)	3	5
Lado	Entrada (EN)	Linha de solda (LS)

Para a análise dos resultados, utilizou-se o software de análise estatística para análise de variância, com um nível de confiança de 95%. Como respostas, foram avaliadas a tensão máxima e o módulo de elasticidade. Os demais parâmetros de injeção utilizados foram: temperatura de injeção de 220 °C (Fig. 35), temperatura do molde 30°C, tempo de resfriamento de 20 s, volume de descompressão de 5 cm³ e força de fechamento 450 kN.

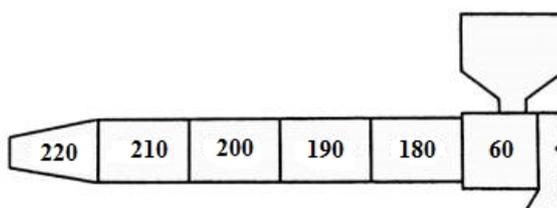


Figura 33: Parâmetros de temperatura para o cilindro da máquina injetora.

Com base no planejamento fatorial, foram definidas as 8 condições experimentais (Tab. 4), sendo moldadas 12 peças e monitorados alguns parâmetros de processo.

Tabela 4 – Tabela com as condições experimentais e parâmetros utilizados.

Condições de moldagem	Velocidade de Injeção	Pressão Máxima de Injeção	Pressão de Recalque	Tempo de Recalque
Condição 1	40 mm/s	900 bar	540 bar	3 s
Condição 2	40 mm/s	900 bar	540 bar	5 s
Condição 3	40 mm/s	900 bar	360 bar	3 s
Condição 4	40 mm/s	900 bar	360 bar	5 s
Condição 5	20 mm/s	750 bar	450 bar	3 s
Condição 6	20 mm/s	750 bar	450 bar	5 s
Condição 7	20 mm/s	750 bar	300 bar	3 s
Condição 8	20 mm/s	750 bar	300 bar	5 s

Códigos que apareceram nos resultados.

- Velocidade de injeção = V
- Pressão de recalque = R
- Tempo de recalque = TR

4.4 Monitoramento da pressão e da temperatura na cavidade

O sensor de pressão utilizado foi o modelo 6001A produzido pela Priamus, que possibilita leituras de pressão dentro da cavidade e em contato direto com o material polimérico injetado. A face sensora é plana e possui 4 mm de diâmetro, sendo que a pressão é obtida através de um cristal piezo elétrico (Quartzo) interno ao sensor. As principais características do sensor 6001A são a faixa de operação de 0 a 2000 bar e a sensibilidade de - 10 pC/bar (pC = picoCoulumb), não havendo limitação na temperatura operacional. Pelo cabeamento de continuidade do sensor, sua limitação de temperatura máxima do molde é de 200°C e, ainda, resistência de isolamento menor que $10^{13} \Omega$ (Fig. 34).



Figura 34: Sensor de Pressão Priamus®.
Fonte: Priamus AG (2017).

O sensor 6001A requer o uso de um amplificador de carga que já vem instalado na máquina injetora Arburg. O amplificador utilizado possui apenas um canal de amplificação (5050A-M04), conforme pode ser visto na Figura 35.



Figura 35: PRIAMUS Easy Charge Amplifier Type 5050A-M04.
Fonte: Priamus AG (2017).

Como pode-se verificar na Figura 38, a última coluna #4082 corresponde à pressão na cavidade no momento da comutação. A variação na magnitude dos valores de pressão deve-se à necessidade de intercambiar os sensores para monitorar a pressão em diferentes locais do molde. A coluna f1403 mostra o número do corpo de prova (CP) que estava injetando no momento. Neste experimento, os corpos de prova de 1 a 6 correspondem à medição da pressão dos corpos de provas da entrada de injeção (EI), e os corpos de prova 7 a 12 correspondem à pressão dos corpos de provas da linha de solda (LS).

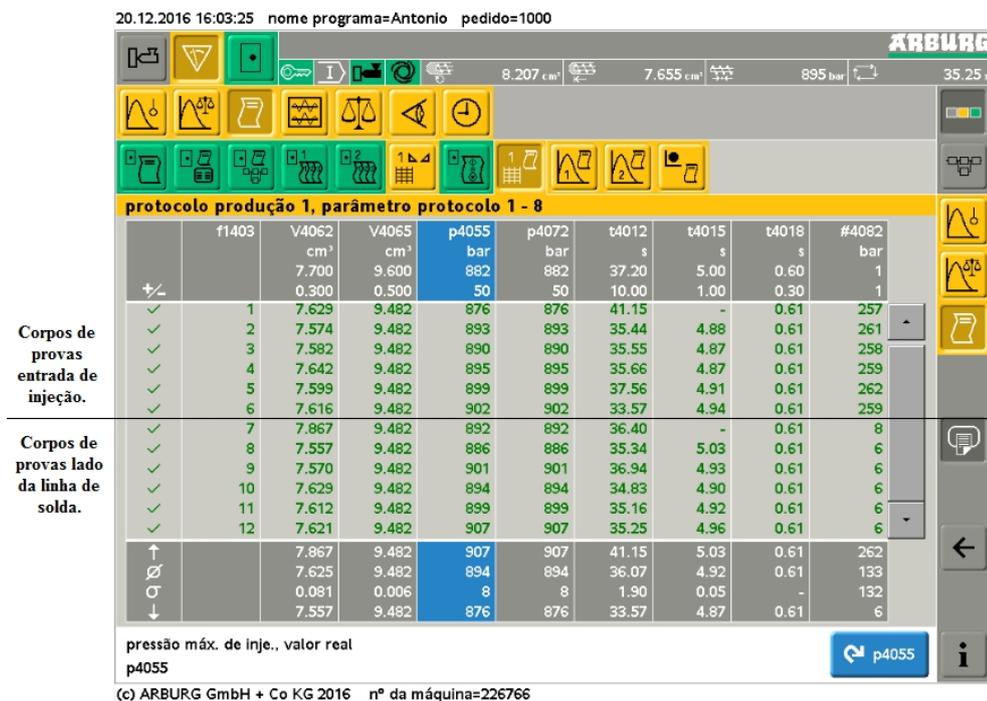


Figura 36: Dados da Interface da Máquina Injetora.

As curvas de pressão foram adquiridas de forma independente, através da função *print screen* na interface gráfica do comando Selogica (Fig. 37). As Figuras foram posteriormente tratadas no *software Engauge Digitizer V.10*, para exportação dos dados de pressão.

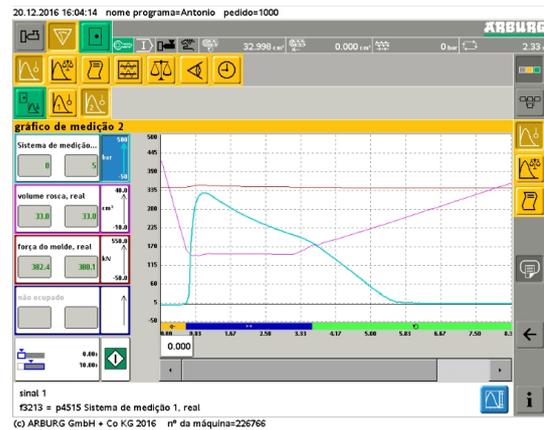
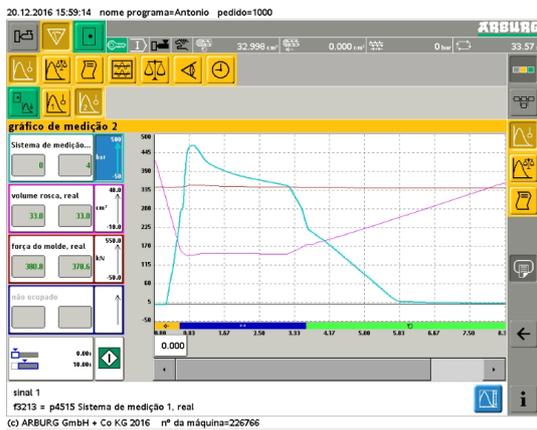


Figura 37: Dados da Pressão de Recalque na Interface da Máquina Injetora do 1º Ciclo.
Gráfico esquerdo apresenta o gráfico das peças 2 a 6, o da direita apresenta o gráfico da peça 8 a 12.

O sensor de temperatura utilizado foi o sensor padrão do tipo N *Miniature Cavity Temperature Sensors*, modelo 4004C, da marca Priamus, utilizado largamente em ambiente industrial, constituído de aço inoxidável, com condutor positivo (NiCrSi) e seu condutor negativo (NiSi), com uma haste de 3 mm de comprimento e 1 mm de diâmetro. Conforme mostra a Figura 38, o cabo de extensão é constituído de material com isolamento plástico, conectores e cabo de extensão com 2,5 m. As principais características deste sensor são: alta precisão e padronização, além do possuir flexibilidade para a máquina injetora Arburg. O sensor atua na faixa de operação de -40 a 1000°C, com limites de erro de 0,004°C. Devido ao seu alto custo, foi adquirido somente um conjunto de sensores.

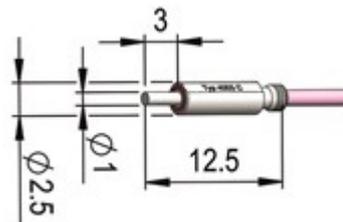


Figura 38: Sensor de Temperatura Priamus®.
Fonte: Priamus AG (2017).

Para armazenar os dados do sensor de temperatura, usou-se um supervisor chamado *LabView*, fornecido pela *National Instruments*. A aquisição de dados foi feita em tempo real, conforme é mostrado na Figura 41.

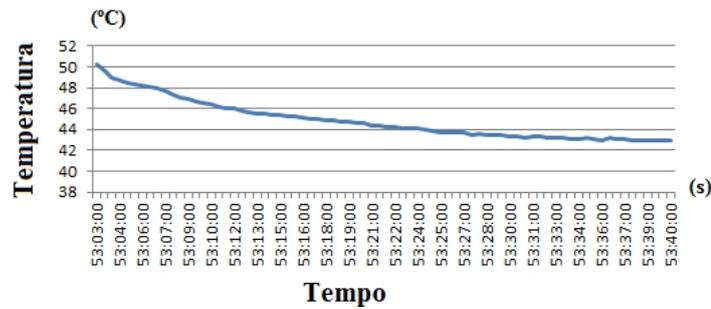


Figura 39: Gráfico das temperaturas do 1º experimento.

4.5 Simulação do processo de injeção

Foram realizadas simulações no software *SolidWorks plastics 2016* para comparação com os resultados obtidos nas injeções dos corpos de prova. Empregou-se, nas análises, as mesmas condições de injeção do planejamento fatorial. Como não havia no banco de dados do software o mesmo material empregado nas moldagens, adotou-se o contra tipo PP BASF Novolen 1300H que apresenta temperaturas de processamento e índice de fluidez similar ao H503.

Foi adotada uma malha do tipo sólido com tamanho médio dos elementos de 1 mm, totalizando 784607 elementos. Para a o preenchimento, foi adotado um perfil constante de vazão, a comutação foi realizada com 99% do volume da peça preenchido e o recalque foi realizado com perfil similar ao utilizado nas moldagens, adotando rampas na aplicação e no alívio das pressões. O tempo de resfriamento utilizado foi de 20 segundos.

O software realiza uma plotagem X-Y contendo a evolução de temperaturas e pressões ao longo do ciclo (Figura 42). Ao final das análises de cada uma das condições, foram mensuradas as pressões e temperatura nos pontos nos quais foram instalados os sensores, resultando nos gráficos das Figuras 40 e 41.

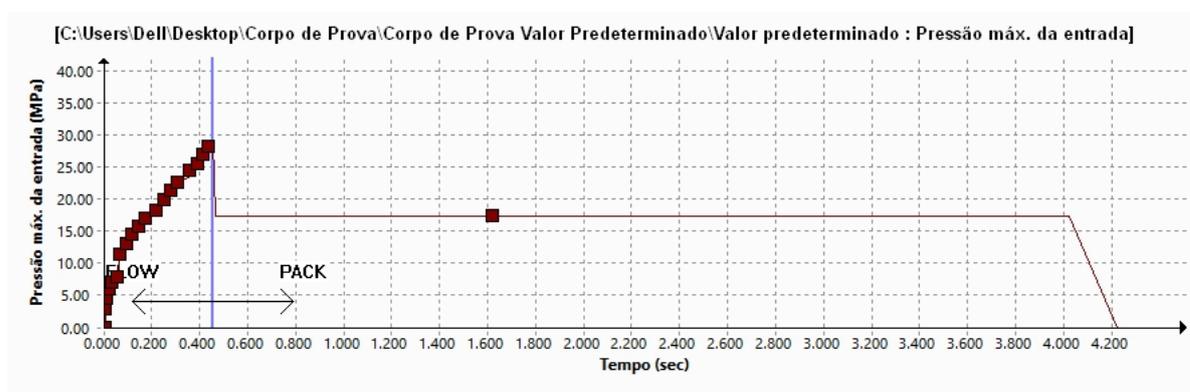


Figura 40: Pressão no ponto de injeção.

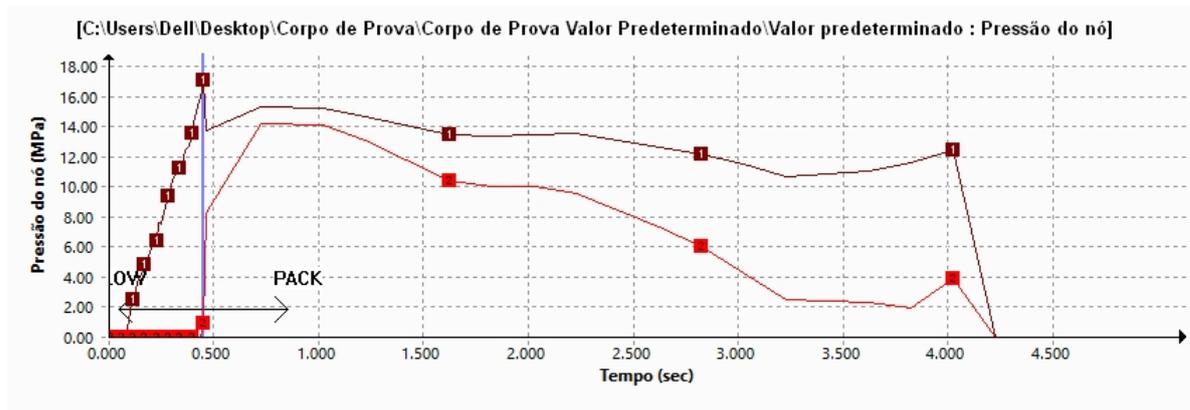


Figura 41: Pressão nos pontos dos sensores de pressão.
 Linha marrom sensor pressão entrada de injeção, Linha vermelha sensor pressão linha de solda.

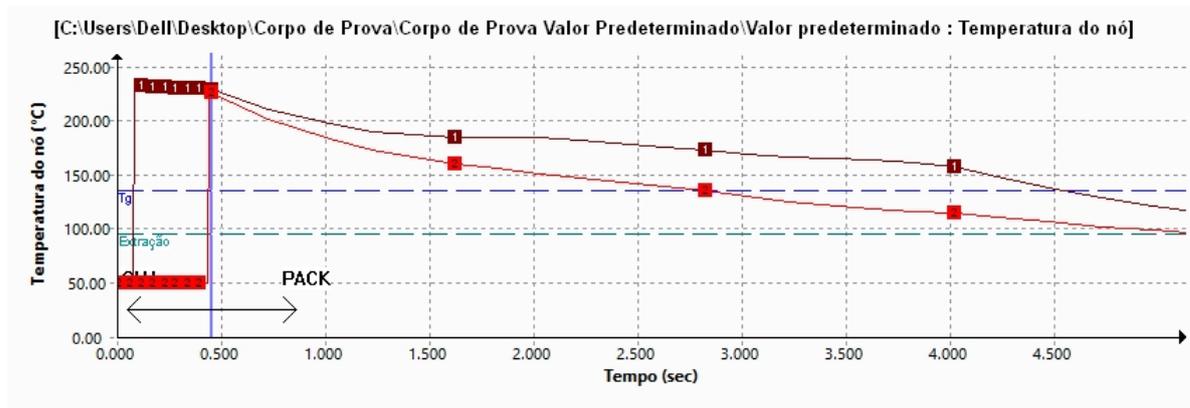


Figura 42: Temperatura nos pontos dos sensores de temperatura.
 Linha marrom sensor temperatura entrada de injeção, Linha vermelha sensor temperatura linha de solda.

4.6 Medição da massa

Para a verificação da massa, utilizou-se uma Balança Analítica Discovery, modelo DV215CD, classe I, fabricada pela Ohaus Corporation, Representada no Brasil, pela Toledo do Brasil, com resolução de 0,1mg. Além da remoção do canal de injeção, as peças injetadas foram separadas para formar a geometria do corpo de prova de tração. Foram pesados 12 corpos de prova de cada condição. Os corpos de prova foram armazenados em laboratório com temperatura ambiente, durante um período de quatro horas antes do início das análises dimensionais e volumétrica. As análises foram realizadas na K&L Laboratório de Metrologia, filial de São José dos Pinhais – PR, laboratório credenciado ao Inmetro.



Figura 43: Medição da massa.
K&L Laboratório de Metrologia.

4.7 Ensaios mecânicos

Foram selecionadas cinco das doze peças injetadas em cada condição. Para os testes de tração, foi utilizada uma máquina de tração, fabricada pela EMIC, modelo DL 2000, equipamento que está localizado no IFSC – Caçador. As propriedades avaliadas no teste de tração foram a Força Máxima, Deformação Máxima, Tensão Máxima e o Módulo de Elasticidade. A velocidade inicial do deslocamento dos braços para o teste de tração foi estabelecida com o corpo de prova do lado da entrada de injeção em 5 mm/min. Ao testar o corpo de prova do lado que tem o fenômeno linha de solda, este apresentou uma boa adesão, não rompendo o corpo de prova e utilizando o limite máximo de abertura do equipamento. Reavaliou-se a velocidade do deslocamento e o tempo disponível do equipamento, aumentou-se a velocidade para 20 mm/min. A Figura 44 mostra o relatório do ensaio recolhido do equipamento e, logo abaixo, a Figura 45 corresponde à curva de Tensão x Deformação Específica.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1: 	909	881	10	11	35	34	465
CP2: 	911	910	10	11	35	35	469
CP3: 	917	*	10	*	35	*	457
CP4: 	925	897	10	11	34	33	456
CP5: 	915	914	10	10	35	35	458
Número CPs	5	4	5	4	5	4	5
Média	915,3	900,4	10,25	10,78	34,70	34,19	461,1
Mediana	914,6	903,4	10,29	10,93	34,67	34,25	458,3
Desv.Padrão	6,174	14,95	0,1734	0,6996	0,2120	0,6299	5,821
Coef.Var.(%)	0,6746	1,661	1,692	6,493	0,6109	1,842	1,262
Mínimo	909,0	880,6	9,971	9,893	34,48	33,45	455,6
Máximo	924,9	914,1	10,40	11,35	34,99	34,81	469,4

Figura 44: Relatório do Ensaio de Tração V40 R60 TR3 EI.

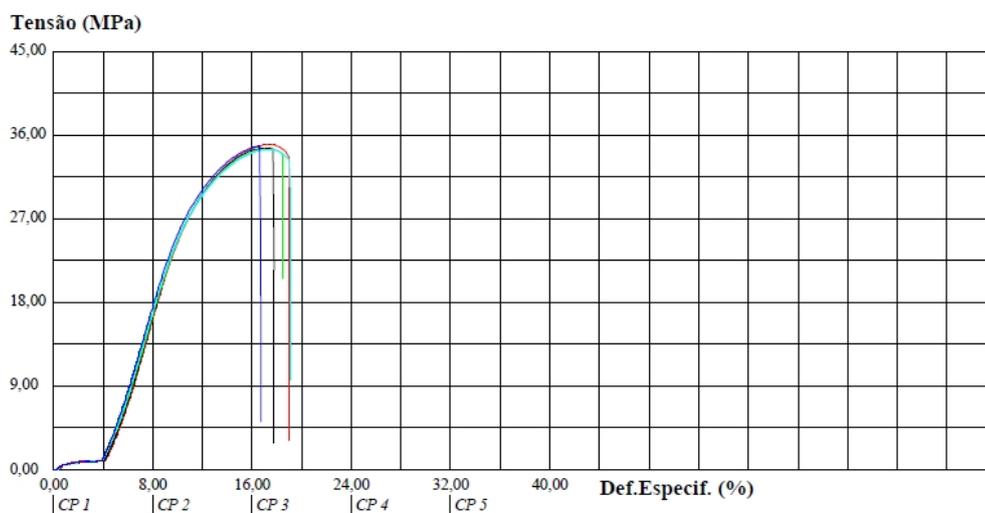


Figura 45: Tensão x Deformação Específica V40 R60 TR3 EI.

Capítulo V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do estudo que envolveu o processo de injeção, recolhidos através da análise dos sensores de temperatura e pressão, utilizando o sistema fatorial dos parâmetros de injeção. Acrescentaram-se os resultados da simulação computacional e resistência mecânica.

5.1 Comparações entre peças moldadas e simuladas: curvas de pressão na cavidade.

Nas Figuras 46 a 49, as linhas contínuas representam o processo de injeção com dados recolhidos da máquina injetora através dos sensores de pressão, e as linhas pontilhadas dizem respeito aos dados recolhidos da simulação do *SolidWorks Plastics*.

Na Figura 46, são representadas as curvas de pressão na cavidade do molde, podendo analisar duas condições de parâmetros bem próximas, diferenciadas pelo tempo de recalque. Comparando as linhas de entrada e linha de solda da condição V40/R60/TR3, obtidas com os sensores de pressão, nota-se que ocorre uma queda brusca da pressão interna, após o término do recalque. Analisando as linhas de entrada e linha de solda da condição V40/R60/TR5, percebe-se uma queda mais suave, tanto na entrada de injeção, como no lado da linha de solda que está associada a um tempo de recalque melhor ajustado. Quando comparados os resultados reais e simulados, percebe-se que as curvas de pressão na cavidade do molde são compatíveis, porém as simuladas apresentam menor número de pontos e resolução, tendo uma queda significativa da pressão logo após o término do recalque.

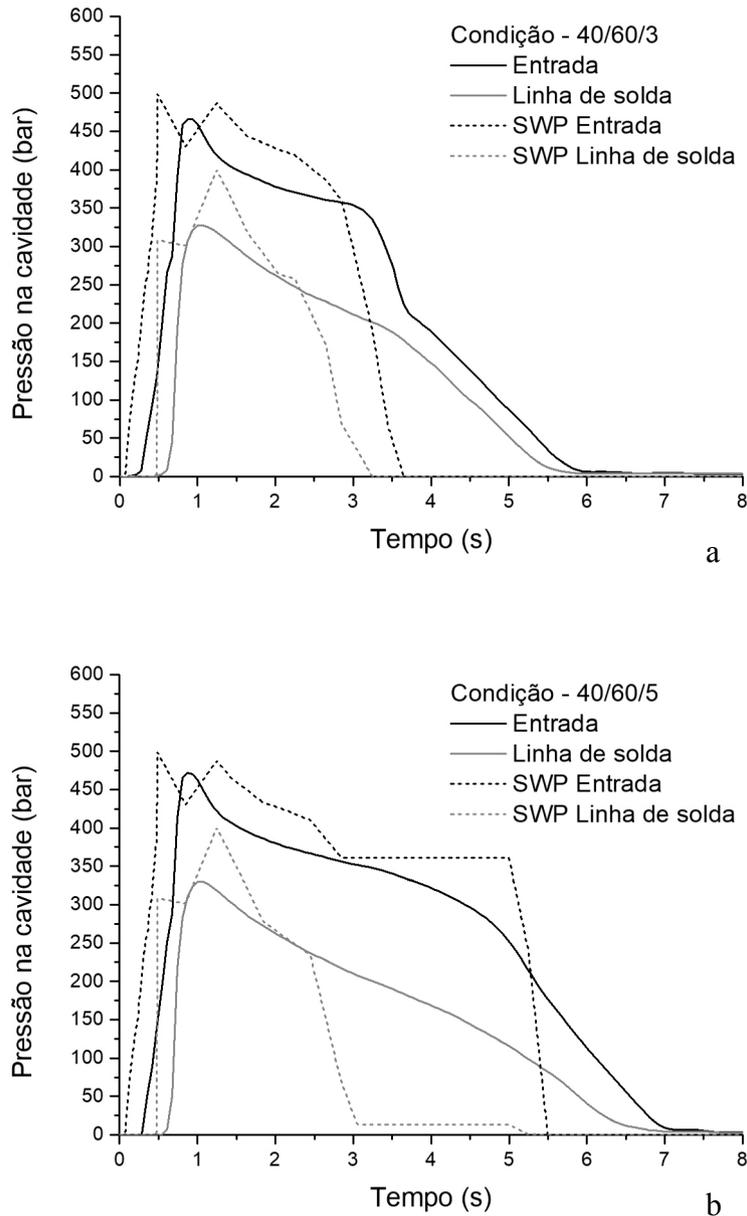


Figura 46: Curva de pressão das condições V40/R60/TR3 (a) e V40/R60/TR5 (b)

A diminuição da magnitude da pressão de recalque observada na Figura 47 reflete no aspecto de uma queda bastante acentuada a partir da comutação nas condições V40/R40/TR3 e 40/40/5. Assim como na condição V40/R60/TR3 o tempo de recalque na condição V40/R40/TR3 promove uma queda brusca na pressão na cavidade. Na condição V40/R40/TR5, tem-se as curvas teoricamente mais favoráveis a uma boa formação da peça. Devido ao maior tempo de recalque, repercutiu uma melhor na curva da região de entrada. Quando comparados os resultados reais e simulados, percebeu-se que as curvas ficaram próximas, sendo no ponto da linha de solda praticamente iguais em magnitude máxima. Para a

simulação computacional, depois de concluída a pressão de recalque, a queda de pressão ficou mais compatível com a realidade.

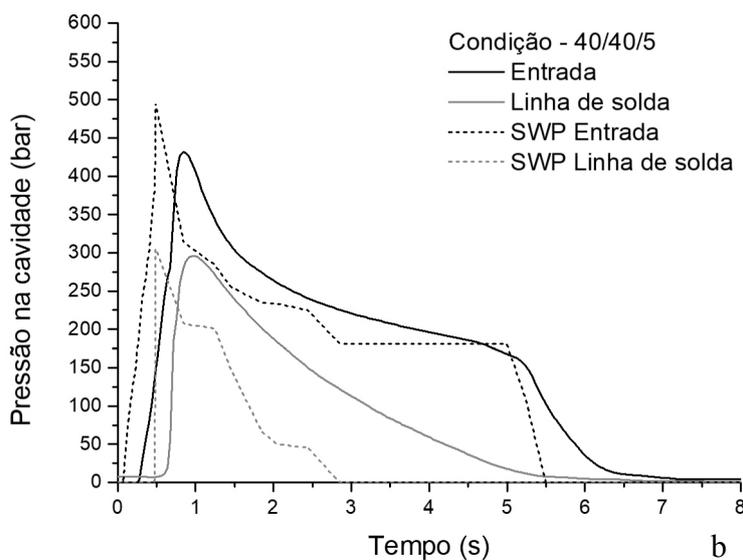
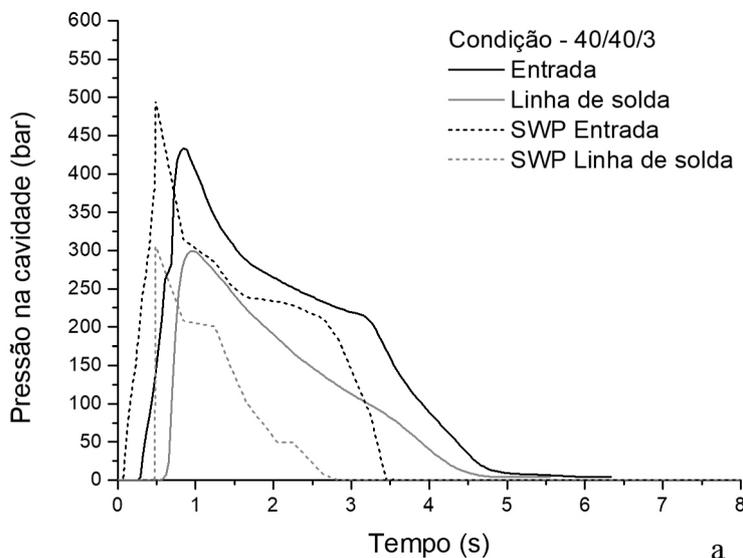


Figura 47: Curva de pressão das condições V40/R40/TR3 e V40/R40/TR5

Na Figura 48, promoveu-se uma injeção com vazão de injeção menor, o que acarretou num aspecto das curvas diferentes das anteriores e magnitudes de pressão inferiores das com $40 \text{ cm}^3/\text{s}$. Comparando as linhas de entrada e linha de solda da condição V20/R60/TR3, a pressão máxima na cavidade foi em torno de 350 bar na entrada, 250 bar na linha de solda e percebe-se uma queda na pressão, após o recalque na região da entrada. Na condição V20/R60/TR5, tem-se as curvas teoricamente melhores. Devido ao maior tempo de recalque, percebe-se uma melhora na curva da região de entrada. Os resultados da simulação se

aproximaram dos reais somente na região da entrada, sendo bastante divergentes na região da linha de solda.

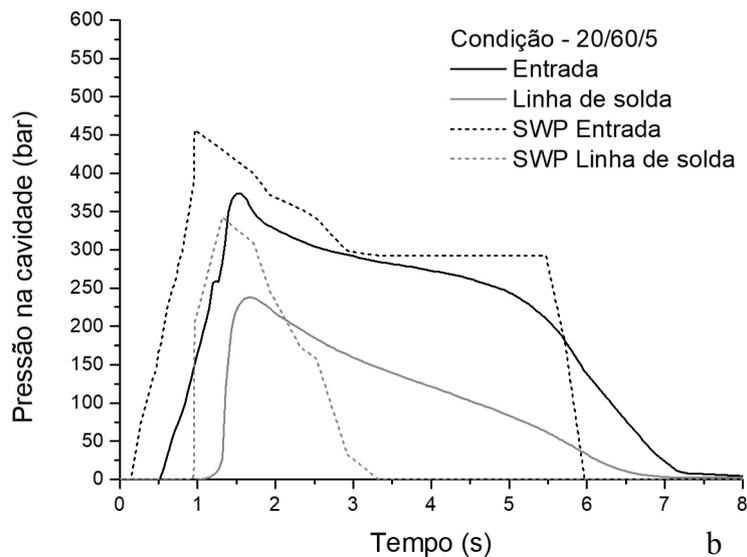
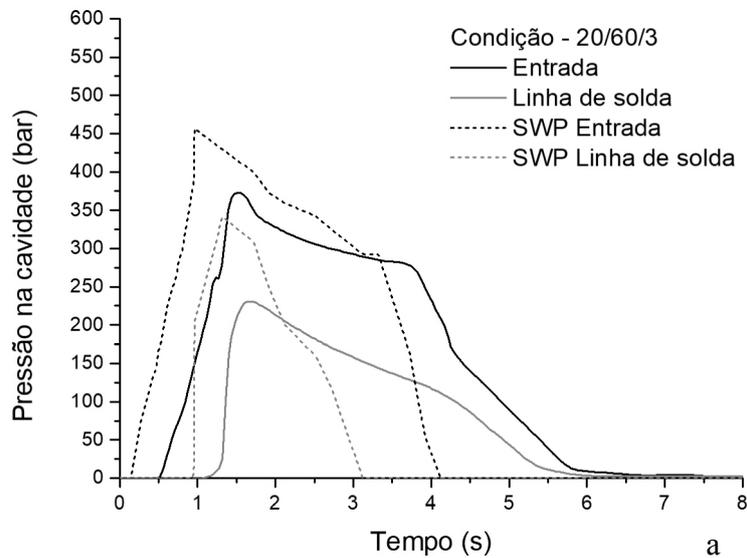


Figura 48: Curva de pressão das condições V20/R60/TR3 e V20/R60/TR5

Para as condições apresentadas na Figura 49, podem-se analisar duas condições de parâmetros bem próximas. Comparando as linhas de entrada e linha de solda da condição V20/R40/TR3, a pressão máxima na cavidade foi em torno de 325 bar na entrada, 190 bar na linha de solda e percebe-se uma queda brusca na pressão após o recalque na região da entrada. Na condição V20/R40/TR5, tem-se a curva na entrada mais alongada e praticamente a mesma curva da condição anterior na região da linha de solda. As curvas das simulações na entrada

são divergentes na magnitude na comutação, porém acompanham bem a fase de recalque. Na linha de solda são divergentes nas duas fases.

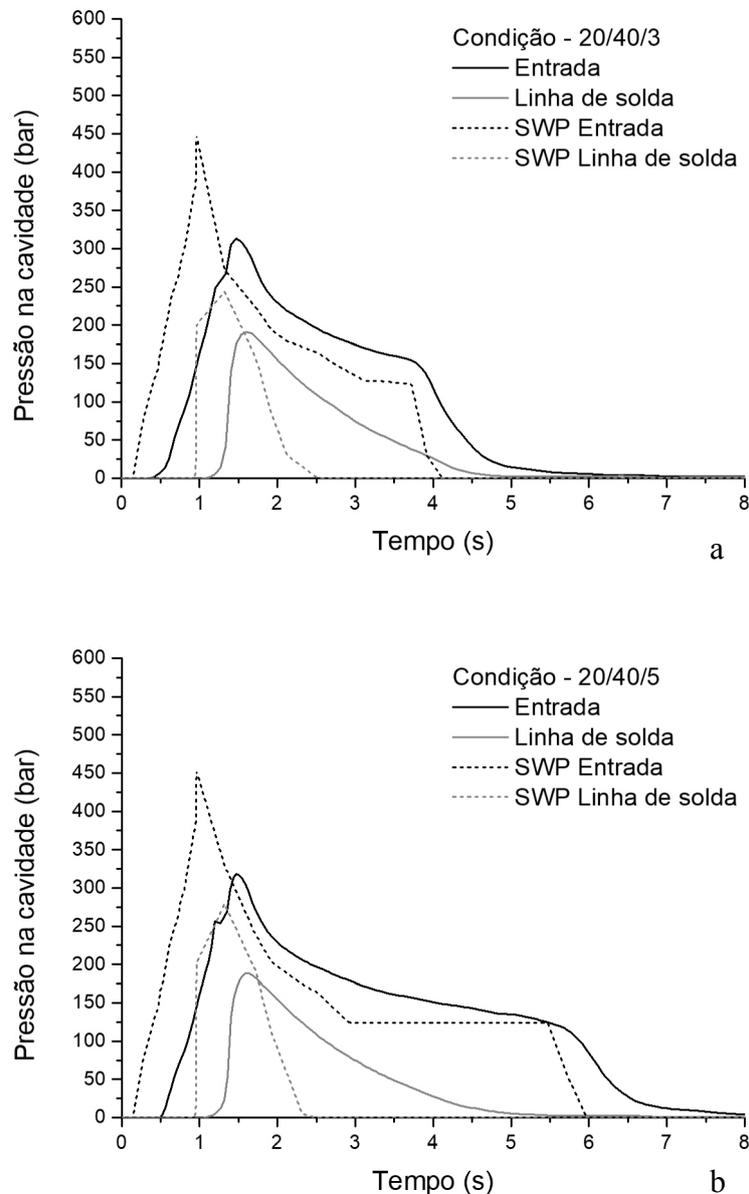


Figura 49: Curva de pressão das condições V20/R40/TR3 e V20/R40/TR5

A condição 20/40/3 mostra a condição de injeção menos favorável para a formação de uma linha de solda resistente. Na condição 40/60/5 tem-se as curvas na condição mais favorável para a formação de uma linha de solda resistente. Devido à maior vazão, foi possível ter uma menor espessura de camada solidificada que, aliada a uma maior pressão de recalque, favoreceu a uma maior pressão na cavidade na região linha de solda (330 bar). Em relação ao tempo de recalque, o aumento de tempo para 5 segundos repercutiu numa melhora na curva da região de entrada de injeção.

5.2 Resultado da avaliação da massa

A medição da massa analisada em termos de valores médios dos corpos de prova (Fig. 50) mostrou que os corpos de provas situados na região da entrada de injeção possuem em média 0,07 gramas a mais que os situados na região da linha de solda. A condição V20/R40/TR3 mostra que o processo de injeção com esses parâmetros refletiu na menor massa média, sendo inferior em relação à condição V40/R60/TR5 em torno de 3% e 4%, nas regiões da entrada e linha de solda, respectivamente.

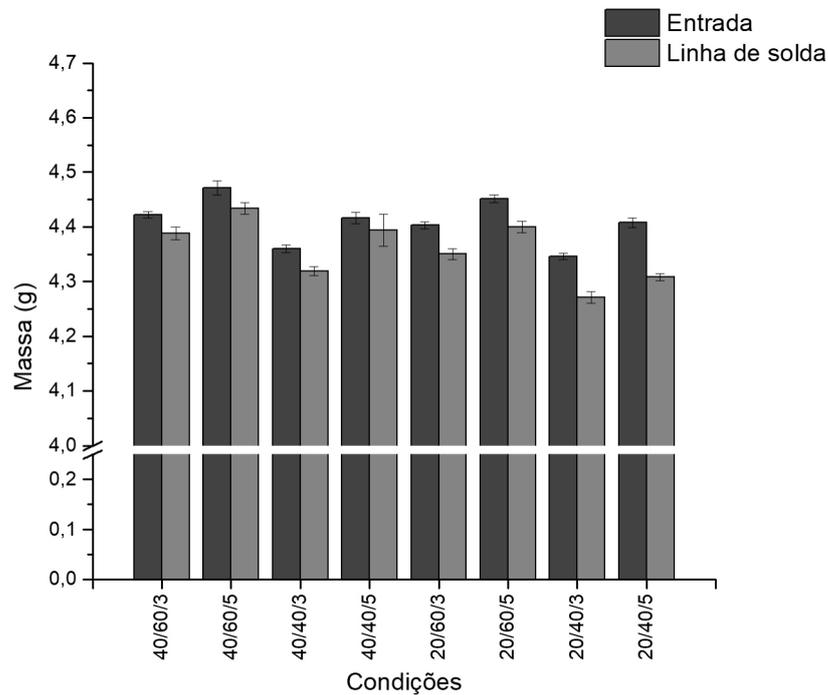


Figura 50 - Massa do corpo de prova através das condições.

Os resultados da massa com base nos fatores analisados são apresentados na Figura 51, conforme análise de variância realizada a partir dos resultados obtidos, a qual evidenciou que todos os fatores se mostraram significativos ($P < 0,05$) e tiveram comportamento conforme o esperado. A pressão de recalque que proporcionou a maior amplitude na variação da massa em relação aos limites estabelecidos causou um efeito de 0,062g. O tempo de recalque e a localização produziram amplitudes próximas, com efeito de 0,053 e 0,052g, respectivamente. A vazão de injeção produziu o menor efeito, com 0,033g entre as condições experimentais. O ajuste dos pontos experimentais ao modelo matemático utilizado (R^2) apresentou um percentual de 94%.

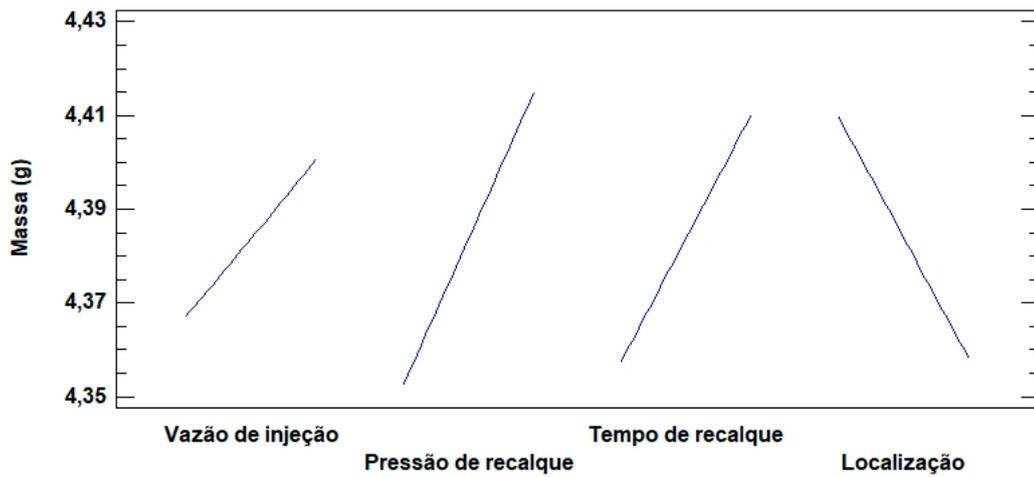


Figura 51: Resultados da massa para os fatores analisados.

5.3 Resistência mecânica

Durante os ensaios de tração houve ruptura somente dos corpos de prova localizados no lado da entrada (Fig. 52). Os corpos de prova com linhas de solda alongaram-se até o limite estabelecido para o ensaio e não se romperam com o afastamento das garras da máquina programadas para o ensaio (Fig. 53). O comportamento de ruptura na entrada pode estar relacionado a efeitos de orientação e tensões residuais junto ao ponto de injeção. A não ruptura na linha de solda deve-se a uma boa junção das frentes de fluxo em todas as condições experimentais que não era esperada no início do trabalho.

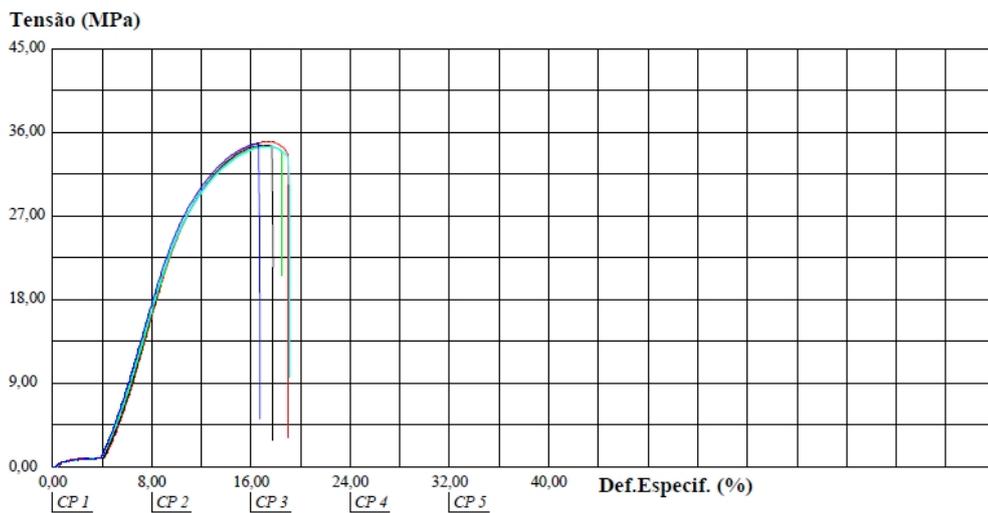


Figura 52 - Tensão x Deformação Especifica V40 R60 TR3 EI.

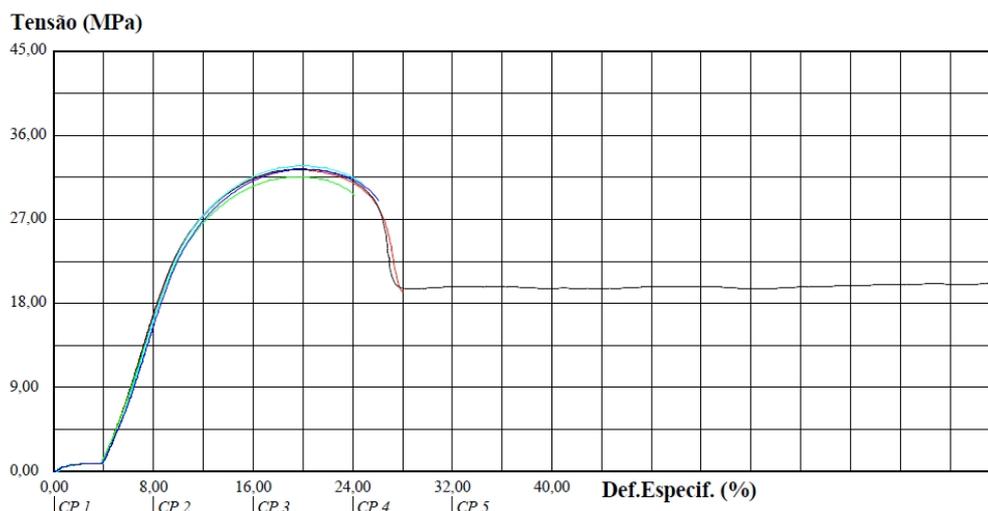


Figura 53 - Tensão x Deformação Específica V40 R60 TR3 LS.

Apesar do efeito de orientação e aspecto de maior rigidez na região de entrada, a tensão máxima na maior parte das condições foi superior às respectivas peças na região da linha de solda (Fig. 54). Isto se deve a uma maior compactação e atuação por maior tempo do efeito do recalque.

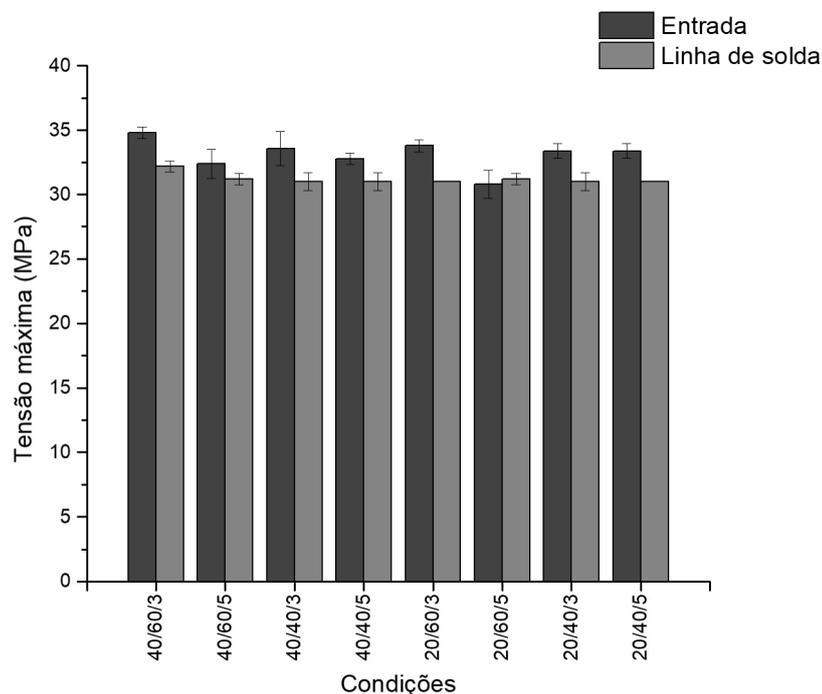


Figura 54 - Resultados da tensão máxima para as condições analisadas.

Os resultados de tensão máxima com base nos fatores analisados são apresentados na Figura 55. Conforme análise de variância, realizada a partir dos resultados obtidos, evidenciou-se apenas que o lado ($P=0,0010$) e o tempo de recalque ($P=0,0268$), os quais se mostraram significativos para maximizar a tensão máxima. O lado com a formação de linha

de solda apresentou os menores valores, quando comparados com lado da entrada de material. O tempo de recalque apresentou um comportamento contraditório quanto à tensão máxima. Houve uma queda na tensão máxima ao elevar-se o tempo de 3 para 5 s. Esta causa pode estar relacionada a efeitos de orientação molecular e tensões residuais nos corpos de prova. A vazão de injeção ($P=0,1924$) e a pressão de recalque ($P=0,9328$) e demais interações não se mostraram significativas para alterar a propriedade supracitada. O ajuste dos pontos experimentais ao modelo matemático utilizado (R^2) apresentou um percentual de 94%.

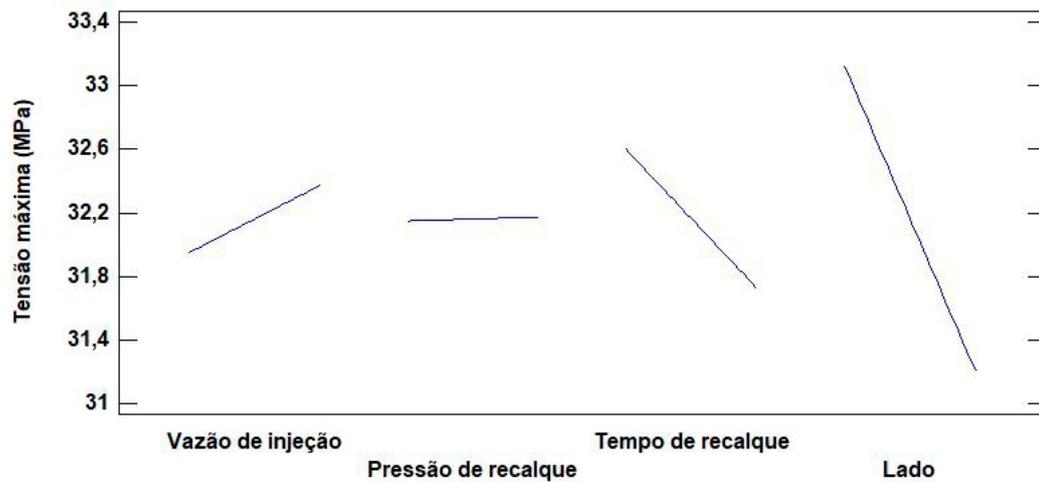


Figura 55: Resultados de tensão máxima para os fatores analisados.

O aspecto de maior rigidez na região de entrada foi observado em todas as condições experimentais (Fig. 56). Assim como a tensão máxima, isto se deve a uma maior compactação e atuação por maior tempo do efeito do recalque na região.

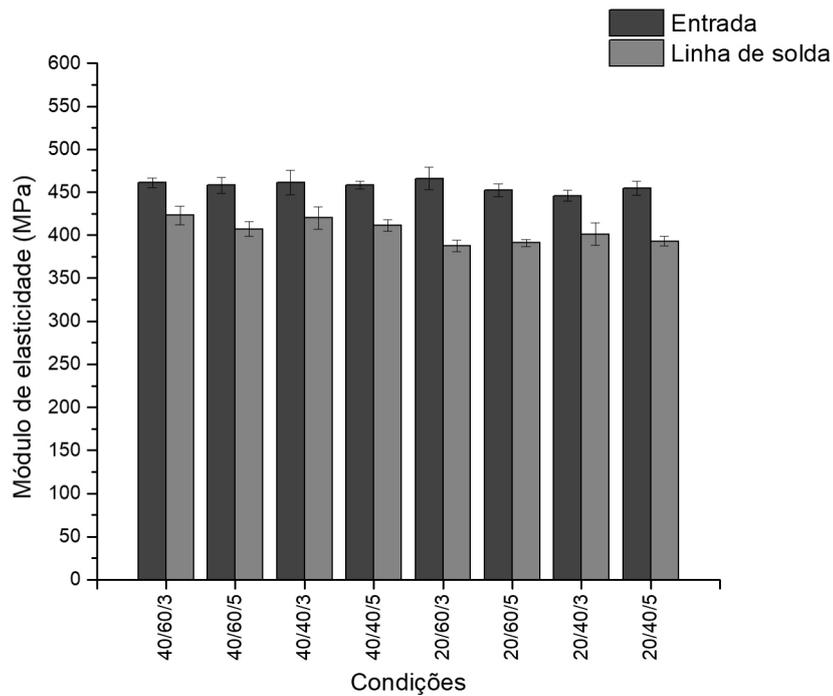


Figura 56 - Resultados do módulo de elasticidade para as condições analisadas.

A Figura 57 apresenta os resultados de módulo de elasticidade com base nos fatores analisados. Assim como para a tensão máxima o local do corpo de prova (presença de linha de solda) foi o fator mais significativo ($P=0,0005$), para o módulo, a vazão de injeção mostrou-se estatisticamente significativa ($P=0,0211$), o que pode ser atribuído a uma maior seção livre ao iniciar-se o recalque. A pressão de recalque ($P=0,3671$), o tempo de recalque ($P=0,8938$) e demais interações não se mostraram significativas para influenciar o módulo de elasticidade. O ajuste dos pontos experimentais ao modelo matemático utilizado (R^2), apresentou um percentual de 95%.

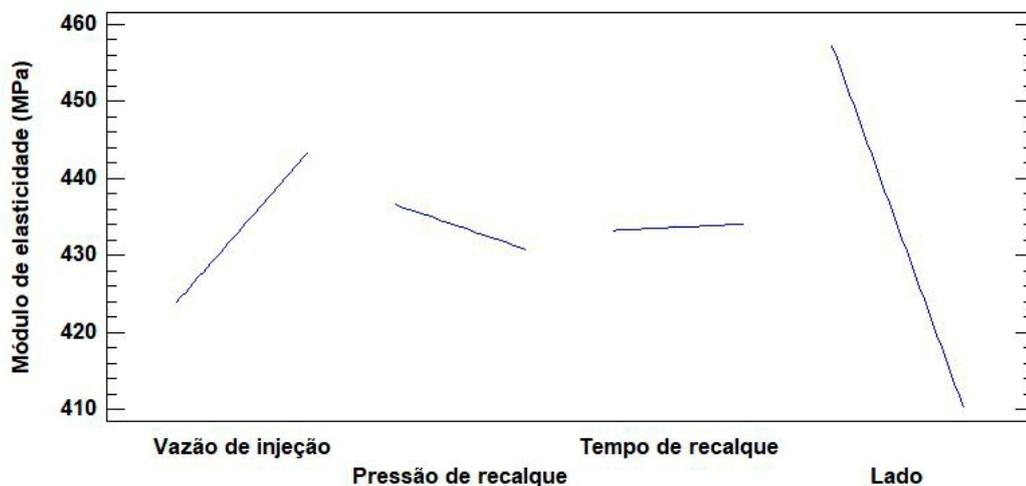


Figura 57: Resultados de módulo de elasticidade para os fatores analisados.

Na construção desta pesquisa foi desenvolvido um molde, para o qual foi adotada uma geometria baseada em corpo de prova de uma norma internacional que possibilitasse o posicionamento dos sensores e tivesse uma espessura compatível com os produtos injetados na atualidade. A utilização do software *SolidWorks Plastics* auxiliou no projeto do molde e localização ideal dos sensores de pressão e temperatura.

O objetivo principal deste trabalho foi o de desenvolver um molde instrumentado para avaliação de linhas de solda em componentes plásticos, visando à comparação de parâmetros de injeção, bem como o controle de qualidade de peças injetadas. Dentro deste contexto, considerando os ensaios e as práticas trabalhadas, entende-se que os objetivos foram alcançados.

Os resultados de simulação do processo de injeção com o software *Solidworks Plastics*, em comparação com os resultados experimentais, mostraram-se bastante promissores. Para as vazões mais altas de injeção testadas, houve uma boa aproximação das curvas de pressão, e para o tempo de recalque, é necessário refinar as simulações, estabelecendo mais pontos para avaliar as curvas geradas.

Entre as condições experimentais avaliadas para a validação do molde, analisaram-se as duas condições extremas, resultando na condição de injeção menos favorável e na condição mais favorável. A maior vazão, pressão e tempo de recalque, repercutiu numa melhor curva na região da entrada de injeção. Esta condição mais favorável foi cerca de 3% maior em massa que a condição menos favorável, o que resultou também em peças mais resistentes e rígidas. Na região da linha de solda, as curvas e a diferença entre massas médias e entre estas mesmas condições foi um pouco mais acentuada (4%).

Durante os ensaios de tração houve ruptura somente dos corpos de prova localizados no lado da entrada. Os corpos de prova com linhas de solda alongaram-se até o limite estabelecido para o ensaio de tração. Contrariando as expectativas iniciais, mesmo na condição menos favorável, houve uma boa formação na junção de linha de solda. Acredita-se que a ruptura na entrada pode estar relacionada a efeitos de orientação e tensões residuais. A não ruptura na linha de solda deveu-se a uma boa junção nas frentes de fluxo.

Visando contribuir com o processo produtivo e de pesquisa acadêmica, propõe-se o desenvolvimento de outros temas de trabalhos que servirão de estímulo para novos estudos, tais como:

- Avaliar outros parâmetros de processo e formas de comutação automática por pressão ou temperatura;
- Desenvolver um molde instrumentado com utilização de câmara quente e confrontar o fenômeno ocorrido na linha de solda usando as mesmas condições experimentais.

Capítulo VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST - **Perfil 2014. Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico.** Disponível em <www.abiplast.org.br>. Acesso em Fevereiro de 2016.

ABIPLAST - **Edição especial de 50 anos - Perfil 2016. Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico.** Disponível em <www.abiplast.org.br>. Acesso em Novembro de 2017.

ABREU, Natanael Ferreira de. **Sistema para processo de injeção de plásticos: Software de suporte para preparadores e reguladores de máquinas no processo de injeção de plásticos.** Faculdade de Tecnologia Sorocaba 2012.

AHRENS, Carlos, FERNANDES, Everson J., SALMORIA, Gean Vitor. **Dimensionamento de canais de refrigeração no projeto de moldes de injeção: avaliação comparativa através de sistemas CAE visando aplicação em processos de fabricação rápida de moldes-protótipos.** V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 2009.

ARBURG - **Informação da Máquina Injetora.** Disponível em <www.arburg.com>. Acesso em Fevereiro de 2017.

ARAÚJO, Jorge Francisco de. **Estudo de Propriedades Mecânicas do Polipropileno Moldado por Injeção em Insertos de Resinas.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus de Curitiba. 2010.

ASTM INTERNATIONAL - **Informações de Normas** – Disponível em <www.astm.org>. Acesso em Novembro de 2015.

BECKER, Lidomar, MIRANDA, Jackson R., BALZER, Palova S., HOWARTH, Janaína L. L., SOUZA, Adriano Fagali de. **Instrumentação de moldes, sensores e simulação de temperatura no processo de injeção de termoplásticos.** 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Itatiaia – Rio de Janeiro 2013.

BECKER, Lidomar. **Estudo da instrumentação de moldes para aquisição da temperatura e pressão no processo de injeção de termoplásticos**. SOCIESC - Sociedade Educacional de Santa Catarina, Instituto Superior Tupy. Joinville 2012.

CATI - Computer Aided Technology - **Informações de Malha** - Disponível em <www.cati.com>. Acesso em Maio de 2016.

BRASKEM - **Informação do Polímero**. Disponível em <www.braskem.com.br>. Acesso em Novembro de 2015.

DOMINGUES, Rafael Ulysses. **Especificação técnica para orçamento, projeto e construção de moldes de injeção de termoplásticos**. Faculdade de Tecnologia de Sorocaba 2012.

HARADA, Júlio. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Editora Artliber, 2004.

HARADA, Júlio. **A importância do projeto de moldes para injeção de termoplásticos**. Revista Ferramental, Santa Catarina, 2006.

JORGE, Adilson Vieira. **A influência das variáveis do processo de injeção de termoplásticos na otimização do ciclo e na qualidade do produto injetado**. FTS – Faculdade de Tecnologia Sorocaba 2010.

KISTLER - **Informações sensores**. Disponível em <www.kistler.com>. Acesso em Outubro de 2015.

KISTLER, *measure, analyse, innovate. Piezoelectric theory. Switzerland*; Artigo: 2004. Disponível em <www.kistler.com>. Acesso em Dezembro de 2015.

MANO, Eloisa Biasotto. MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros 1. - 2**. Edição. 2ª Reimpressão - São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MARTINS, Allisson David de Oliveira. **Indústria de transformação de plásticos**. Banco do Nordeste 2014.

MDL-BRASIL - **Informações porta molde**. Disponível em <www.mdl-brasil.com.br>. Acesso em Outubro de 2015.

MIRANDA, Jackson R. de. **Estudo da influência da viscosidade do polímero, da velocidade de injeção e do material da cavidade do molde sobre a pressão e temperatura durante o processo de injeção**. Dissertação defendida e aprovada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Instituto Superior Tupy – SOCIESC. 2012.

PERRARO, Helton Júlio. **Análise e proposta de melhorias no processo de moldagem por injeção de poliamidas**. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina 2007.

PFEIFER, Diogo Coletto. **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)** - Florianópolis, SC, 2013. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

PORTALCAD - **Informações do *Solidworks Plastics***. Disponível em <www.portalcad.com>. Acesso em Março de 2016.

PRIAMUS SYSTEM TECHNOLOGIES AG - **Informações Sensores** – Disponível em <www.priamus.com>. Acesso em Novembro de 2016.

REPIAN PROJETANDO SOLUÇÕES - **Informações da tabela sobre o Polímero**. Disponível em <www.repian.com.br> Acesso em Dezembro de 2015.

SILVA, Robson Pache. **Artigo sobre proposta de arranjo físico para uma indústria de transformação de termoplásticos baseado nos conceitos de manufatura enxuta**. Faculdade Horizontina. 2012.

SILVA, Sérgio Luis. **Sistemática para o projeto do sistema de refrigeração de moldes para injeção de polímeros**. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina 2009.

SOLIDWORKS BRASIL - **Informações do *Solidworks Plastics***. Disponível em <www.solidworksbrasil.com.br>. Acesso em Março de 2016.

SOUZA, Adrian Fagali. **Congresso sobre análise da influência do *Conformal Cooling* em um molde de injeção de plástico comparado com a refrigeração convencional por simulação de transferência de calor.** Florianópolis. 2013.

TORRES, Jocelito. **Prevenção de acidentes em máquinas injetoras de plástico.** Escola de Educação Profissional SENAI NILO BETTANIN 2007.

Apêndice 1 - Resultados complementares do experimento 40/60/3

Massa do Experimento 40/60/3

V = 40 / R = 60 / TR = 3 / Horas = 15:56

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,42224	4,42255	4,42239	4,42251	4,42236
Peça 02	4,41482	4,41515	4,41503	4,41505	4,41512
Peça 03	4,41226	4,41223	4,41223	4,41225	4,41227
Peça 04	4,42722	4,42719	4,42718	4,42721	4,42722
Peça 05	4,42212	4,42227	4,42222	4,42228	4,42231
Peça 06	4,41807	4,41825	4,41821	4,41823	4,41826
Peça 07	4,42682	4,42696	4,42684	4,42685	4,42684
Peça 08	4,43231	4,43246	4,43232	4,43235	4,43234
Peça 09	4,41564	4,41563	4,41565	4,41563	4,41562
Peça 10	4,43001	4,43018	4,43008	4,43007	4,43011
Peça 11	4,41777	4,41769	4,41771	4,41773	4,41769
Peça 12	4,42337	4,42332	4,42335	4,42337	4,42336

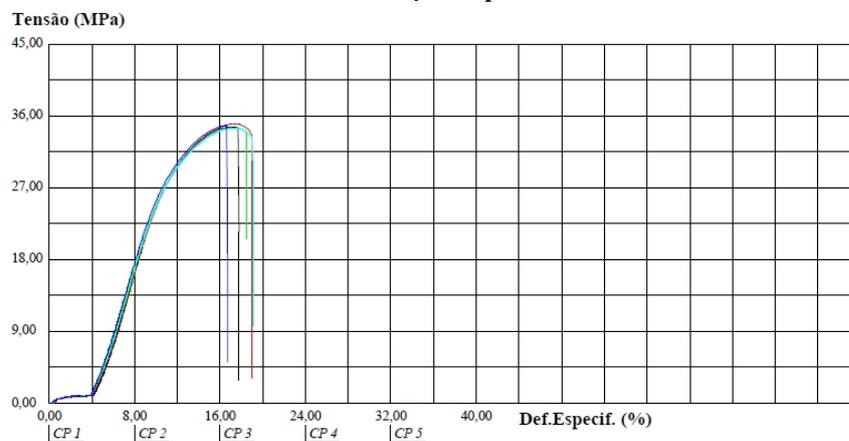
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,37269	4,37264	4,37265	4,37266	4,37265
Peça 02	4,37730	4,37734	4,37735	4,37735	4,37731
Peça 03	4,37922	4,37928	4,37925	4,37924	4,37925
Peça 04	4,37484	4,37552	4,37489	4,37488	4,37485
Peça 05	4,38008	4,38022	4,38012	4,38011	4,38009
Peça 06	4,39548	4,39549	4,39549	4,39548	4,39551
Peça 07	4,41138	4,41150	4,41142	4,41241	4,41139
Peça 08	4,40066	4,40066	4,40065	4,40067	4,40069
Peça 09	4,40181	4,40169	4,40179	4,40182	4,40175
Peça 10	4,39089	4,39071	4,39085	4,39086	4,39084
Peça 11	4,39288	4,39286	4,39288	4,39285	4,39288
Peça 12	4,38466	4,38464	4,38466	4,38465	4,38469

Ensaio de Tração V40 R60 TR3 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elastíc. (MPa)
CP1:	909	881	10	11	35	34	465
CP2:	911	910	10	11	35	35	469
CP3:	917	*	10	*	35	*	457
CP4:	925	897	10	11	34	33	456
CP5:	915	914	10	10	35	35	458
Número CPs	5	4	5	4	5	4	5
Média	915,3	900,4	10,25	10,78	34,70	34,19	461,1
Mediana	914,6	903,4	10,29	10,93	34,67	34,25	458,3
Desv.Padrão	6,174	14,95	0,1734	0,6996	0,2120	0,6299	5,821
Coef.Var.(%)	0,6746	1,661	1,692	6,493	0,6109	1,842	1,262
Mínimo	909,0	880,6	9,971	9,893	34,48	33,45	455,6
Máximo	924,9	914,1	10,40	11,35	34,99	34,81	469,4

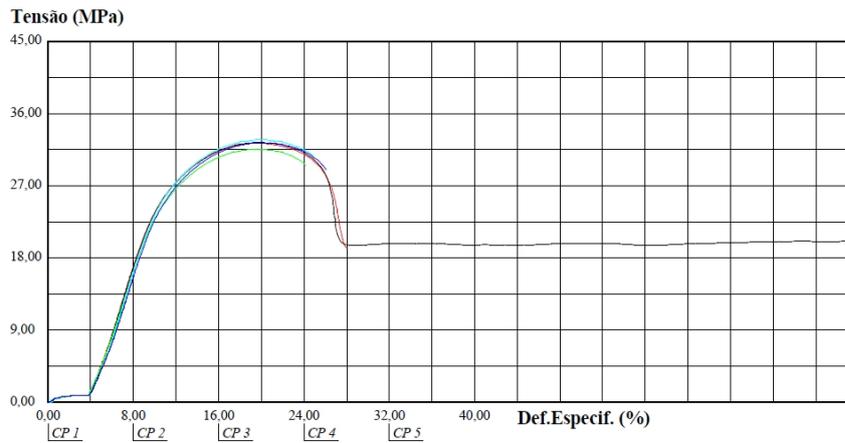
Tensão x Deformação Especifica V40 R60 TR3 EI.



Ensaio de Tração V40 R60 TR3 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1: 	841	*	12	*	32	*	430
CP2: 	841	*	12	*	32	*	427
CP3: 	823	*	12	*	32	*	408
CP4: 	846	*	12	*	33	*	434
CP5: 	842	*	12	*	32	*	416
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	838,6	*	11,81	*	32,28	*	423,0
Mediana	841,2	*	11,81	*	32,38	*	426,9
Desv.Padrão	8,948	*	0,1518	*	0,4296	*	10,80
Coef.Var.(%)	1,067	*	1,285	*	1,331	*	2,553
Mínimo	822,9	*	11,67	*	31,57	*	408,2
Máximo	845,6	*	12,04	*	32,73	*	434,2

Tensão x Deformação Específica V40 R60 TR3 LS.



Apêndice 2 - Resultados complementares do experimento 40/60/5

Massa do Experimento 40/60/5

V = 40 / R = 60 / TR = 5 / Hrs = 15:56

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,48027	4,48009	4,48011	4,48012	4,48008
Peça 02	4,46768	4,46776	4,46779	4,46772	4,46775
Peça 03	4,48044	4,48065	4,48064	4,48062	4,48059
Peça 04	4,47084	4,47086	4,47084	4,47083	4,47086
Peça 05	4,44691	4,44697	4,44695	4,44695	4,44697
Peça 06	4,46468	4,46469	4,46469	4,46468	4,46366
Peça 07	4,47005	4,46988	4,47002	4,47005	4,46999
Peça 08	4,49435	4,49408	4,49407	4,49411	4,49408
Peça 09	4,45748	4,45753	4,45751	4,45753	4,45749
Peça 10	4,48183	4,48203	4,48199	4,48201	4,48197
Peça 11	4,46441	4,46435	4,46439	4,46441	4,46438
Peça 12	4,48722	4,48718	4,48721	4,48719	4,48718
Peça 13	4,45718	4,45720	4,45719	4,45718	4,45719
Peça 14	4,47498	4,47494	4,47497	4,47496	4,47494

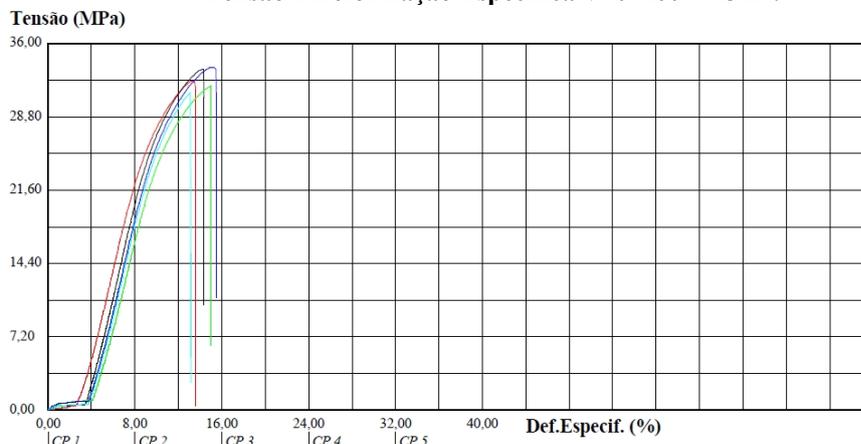
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,45962	4,45950	4,45956	4,45958	4,45956
Peça 02	4,42999	4,42992	4,42998	4,42997	4,42999
Peça 03	4,42880	4,42887	4,42887	4,42885	4,42886
Peça 04	4,42835	4,42837	4,42835	4,42836	4,42834
Peça 05	4,42254	4,42267	4,42261	4,42262	4,42259
Peça 06	4,45164	4,45169	4,45167	4,45169	4,45167
Peça 07	4,42640	4,42652	4,42648	4,42647	4,42648
Peça 08	4,44141	4,44127	4,44132	4,44131	4,44129
Peça 09	4,42421	4,42402	4,42418	4,42417	4,42417
Peça 10	4,43139	4,43135	4,43138	4,43139	4,43136
Peça 11	4,42736	4,42743	4,42741	4,42739	4,42738
Peça 12	4,44045	4,44054	4,44051	4,44051	4,44049
Peça 13	4,42875	4,42910	4,42879	4,42878	4,42879
Peça 14	4,43192	4,43181	4,43188	4,43187	4,43181

Ensaio de Tração V40 R60 TR5 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1	844	841	8	8	32	32	457
CP2	872	872	9	9	33	33	469
CP3	828	827	9	9	32	32	444
CP4	827	824	8	8	31	31	458
CP5	883	881	9	9	34	34	462
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	850,7	849,0	8,490	8,525	32,50	32,44	458,2
Mediana	844,3	841,4	8,540	8,540	32,35	32,24	458,3
Desv.Padrão	25,33	26,01	0,5591	0,5819	1,064	1,095	9,424
Coef.Var.(%)	2,977	3,064	6,586	6,825	3,275	3,376	2,057
Mínimo	826,8	823,9	7,858	7,797	31,18	31,07	443,7
Máximo	882,5	881,2	9,065	9,210	33,67	33,61	469,5

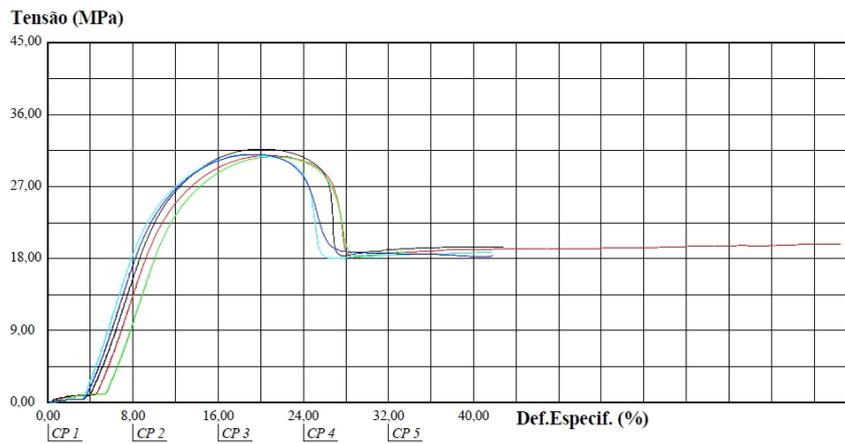
Tensão x Deformação Especifica V40 R60 TR5 EI.



Ensaio de Tração V40 R60 TR5 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1:	811	*	12	*	31	*	397
CP2:	836	*	12	*	32	*	405
CP3:	814	*	13	*	31	*	403
CP4:	822	*	11	*	31	*	420
CP5:	815	*	11	*	31	*	411
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	819,5	*	12,04	*	31,09	*	407,2
Mediana	814,7	*	12,08	*	30,98	*	404,5
Desv.Padrão	10,23	*	0,5501	*	0,3826	*	8,564
Coef.Var.(%)	1,249	*	4,569	*	1,231	*	2,103
Mínimo	811,1	*	11,48	*	30,74	*	397,3
Máximo	836,4	*	12,68	*	31,73	*	419,7

Tensão x Deformação Específica V40 R60 TR5 LS.



Apêndice 3 - Resultados complementares do experimento 40/40/3

Massa do Experimento 40/40/3

$$V = 40 / R = 40 / TR = 3 / \text{Hrs} = 15:56$$

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,36388	4,36400	4,36392	4,36495	4,36394
Peça 02	4,37170	4,37166	4,37168	4,37167	4,37169
Peça 03	4,34780	4,34786	4,34782	4,34784	4,34788
Peça 04	4,35434	4,35439	4,35435	4,35436	4,35534
Peça 05	4,36173	4,36165	4,36169	4,36171	4,36169
Peça 06	4,35962	4,35958	4,35959	4,35959	4,35961
Peça 07	4,37437	4,37424	4,37435	4,37432	4,37431
Peça 08	4,35525	4,35533	4,35529	4,35528	4,35526
Peça 09	4,35949	4,35952	4,35949	4,35951	4,35951
Peça 10	4,35760	4,35750	4,35754	4,35753	4,35751
Peça 11	4,35649	4,35655	4,35652	4,35651	4,35652
Peça 12	4,36466	4,36468	4,36466	4,36468	4,36467

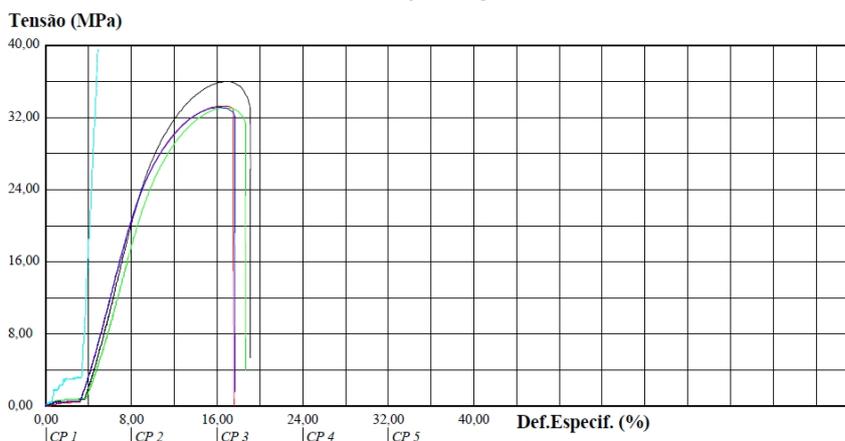
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,33566	4,33555	4,33555	4,33555	4,33555
Peça 02	4,32898	4,32935	4,32935	4,32935	4,32935
Peça 03	4,31806	4,31817	4,31817	4,31817	4,31817
Peça 04	4,31280	4,31271	4,31271	4,31271	4,31271
Peça 05	4,32221	4,32253	4,32253	4,32253	4,32253
Peça 06	4,31866	4,31848	4,31848	4,31848	4,31848
Peça 07	4,33036	4,33040	4,33040	4,33040	4,33040
Peça 08	4,31577	4,31592	4,31592	4,31592	4,31592
Peça 09	4,31160	4,31157	4,31157	4,31157	4,31157
Peça 10	4,31826	4,31819	4,31819	4,31819	4,31819
Peça 11	4,30619	4,30617	4,30617	4,30617	4,30617
Peça 12	4,31072	4,31068	4,31068	4,31068	4,31068

Ensaio de Tração V40 R40 TR3 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1: 	877	868	10	11	33	33	457
CP2: 	881	817	10	11	36	33	484
CP3: 	883	846	10	11	33	32	445
CP4: 	844	801	10	11	211	200	2922
CP5: 	875	858	10	11	33	33	460
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	871,8	838,0	9,887	10,89	69,32	66,16	953,7
Mediana	877,1	846,0	9,948	10,82	33,32	32,98	460,4
Desv. Padrão	15,89	28,27	0,2326	0,3942	79,23	74,92	1101
Coef.Var.(%)	1,823	3,374	2,353	3,619	114,3	113,2	115,4
Mínimo	843,9	800,5	9,576	10,53	33,12	31,74	444,7
Máximo	882,5	868,2	10,13	11,43	211,0	200,2	2922

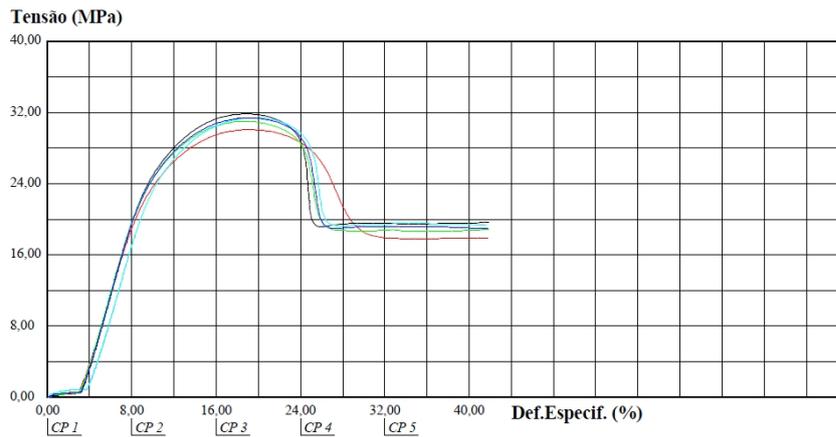
Tensão x Deformação Especifica V40 R40 TR3 EI.



Ensaio de Tração V40 R40 TR3 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1	794	*	11	*	30	*	399
CP2	812	*	11	*	32	*	433
CP3	804	*	11	*	31	*	423
CP4	808	*	12	*	31	*	418
CP5	805	*	11	*	31	*	428
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	804,7	*	11,35	*	31,16	*	420,3
Mediana	805,5	*	11,29	*	31,39	*	422,7
Desv.Padrão	6,388	*	0,1771	*	0,6630	*	13,22
Coef.Var.(%)	0,7938	*	1,561	*	2,128	*	3,147
Mínimo	794,4	*	11,24	*	30,10	*	398,9
Máximo	811,6	*	11,66	*	31,86	*	433,2

Tensão x Deformação Especifica V40 R40 TR3 LS.



Apêndice 4 - Resultados complementares do experimento 40/40/5

Massa do Experimento 40/40/5

$$V = 40 / R = 40 / TR = 5 / \text{Hrs} = 15:56$$

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,42555	4,42552	4,42552	4,42552	4,42552
Peça 02	4,44528	4,44516	4,44516	4,44516	4,44516
Peça 03	4,40183	4,40188	4,40188	4,40188	4,40188
Peça 04	4,41657	4,41665	4,41665	4,41665	4,41665
Peça 05	4,41258	4,41261	4,41261	4,41261	4,41261
Peça 06	4,42237	4,42238	4,42238	4,42238	4,42238
Peça 07	4,40353	4,40348	4,40348	4,40348	4,40348
Peça 08	4,41366	4,41348	4,41348	4,41348	4,41348
Peça 09	4,41195	4,41192	4,41192	4,41192	4,41192
Peça 10	4,42027	4,42004	4,42004	4,42004	4,42004
Peça 11	4,41121	4,41128	4,41128	4,41128	4,41128
Peça 12	4,41054	4,41051	4,41051	4,41051	4,41051

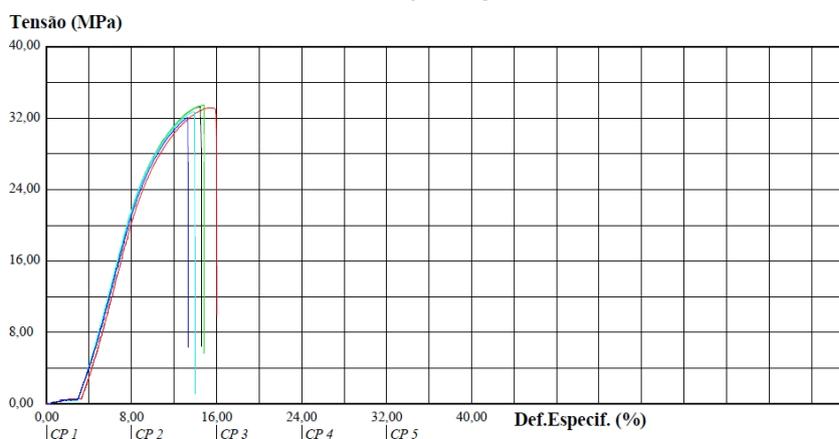
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,38188	4,38199	4,42552	4,42552	4,42552
Peça 02	4,36597	4,36595	4,44516	4,44516	4,44516
Peça 03	4,35749	4,35754	4,40188	4,40188	4,40188
Peça 04	4,36160	4,36175	4,41665	4,41665	4,41665
Peça 05	4,34175	4,34189	4,41261	4,41261	4,41261
Peça 06	4,36759	4,36762	4,42238	4,42238	4,42238
Peça 07	4,35525	4,35533	4,40348	4,40348	4,40348
Peça 08	4,35315	4,35324	4,41348	4,41348	4,41348
Peça 09	4,35760	4,35766	4,41192	4,41192	4,41192
Peça 10	4,35920	4,35917	4,42004	4,42004	4,42004
Peça 11	4,36330	4,36332	4,41128	4,41128	4,41128
Peça 12	4,35746	4,35741	4,41051	4,41051	4,41051

Ensaio de Tração V40 R40 TR5 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1:	879	877	9	9	33	33	458
CP2:	866	866	9	9	33	33	460
CP3:	873	873	9	9	33	33	464
CP4:	855	854	8	8	33	33	458
CP5:	845	844	8	8	32	32	451
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	863,6	862,7	8,592	8,639	32,93	32,89	458,2
Mediana	865,8	865,8	8,621	8,621	33,16	33,08	458,0
Desv.Padrão	13,68	13,76	0,4820	0,5752	0,5496	0,5695	4,569
Coef.Var.(%)	1,585	1,595	5,609	6,659	1,669	1,731	0,9972
Mínimo	845,3	843,6	7,982	7,915	32,07	32,01	451,1
Máximo	879,4	877,2	9,236	9,469	33,44	33,44	463,6

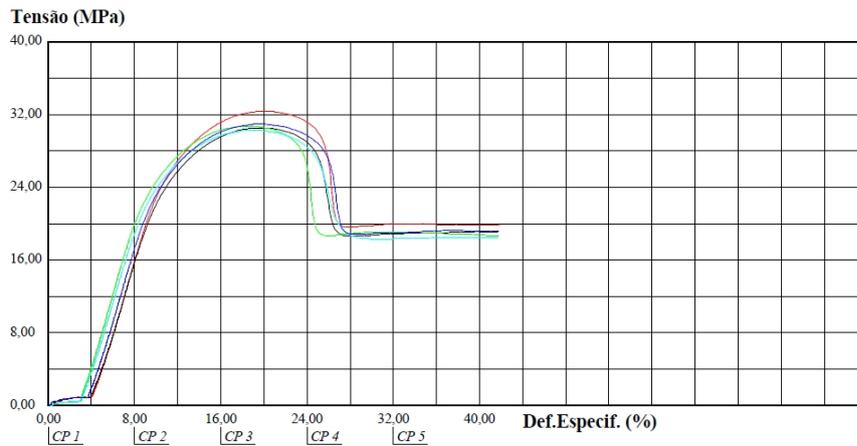
Tensão x Deformação Especifica V40 R40 TR5 EI.



Ensaio de Tração V40 R40 TR5 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1:	827	*	12	*	32	*	417
CP2:	803	*	12	*	31	*	404
CP3:	805	*	11	*	31	*	419
CP4:	800	*	11	*	30	*	407
CP5:	805	*	12	*	31	*	410
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	808,0	*	11,56	*	30,98	*	411,5
Mediana	805,1	*	11,72	*	30,74	*	409,8
Desv.Padrão	10,76	*	0,4139	*	0,8122	*	6,615
Coef.Var.(%)	1,332	*	3,579	*	2,621	*	1,607
Mínimo	799,7	*	10,99	*	30,30	*	403,8
Máximo	826,8	*	12,06	*	32,37	*	419,4

Tensão x Deformação Especifica V40 R40 TR5 LS.



Apêndice 5 - Resultados complementares do experimento 20/60/3

Massa do Experimento 20/60/3

$$V = 20 / R = 60 / TR = 3 / \text{Hrs} = 15:56$$

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,40162	4,40169	4,40169	4,40169	4,40169
Peça 02	4,39675	4,39690	4,39690	4,39690	4,39690
Peça 03	4,40555	4,40567	4,40567	4,40567	4,40567
Peça 04	4,39403	4,39409	4,39409	4,39409	4,39409
Peça 05	4,39902	4,39893	4,39893	4,39893	4,39893
Peça 06	4,41180	4,41200	4,41200	4,41200	4,41200
Peça 07	4,40566	4,40561	4,40561	4,40561	4,40561
Peça 08	4,39447	4,39442	4,39442	4,39442	4,39442
Peça 09	4,40320	4,40326	4,40326	4,40326	4,40326
Peça 10	4,41477	4,41448	4,41448	4,41448	4,41448
Peça 11	4,41029	4,41024	4,41024	4,41024	4,41024
Peça 12	4,40155	4,40153	4,40153	4,40153	4,40153

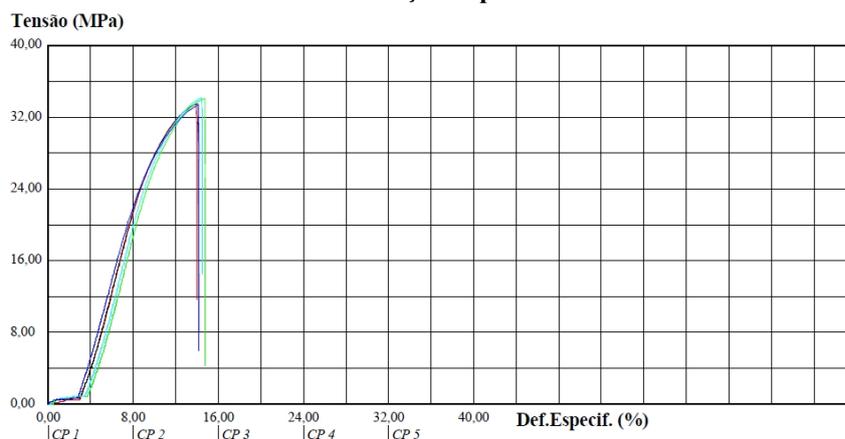
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,37432	4,37431	4,37431	4,37431	4,37431
Peça 02	4,33881	4,33869	4,33869	4,33869	4,33869
Peça 03	4,34601	4,34602	4,34602	4,34602	4,34602
Peça 04	4,33854	4,33771	4,33771	4,33771	4,33771
Peça 05	4,34222	4,34203	4,34203	4,34203	4,34203
Peça 06	4,35833	4,35824	4,35824	4,35824	4,35824
Peça 07	4,35547	4,35574	4,35574	4,35574	4,35574
Peça 08	4,34126	4,34121	4,34121	4,34121	4,34121
Peça 09	4,35662	4,35662	4,35662	4,35662	4,35662
Peça 10	4,35021	4,35028	4,35028	4,35028	4,35028
Peça 11	4,35468	4,35474	4,35474	4,35474	4,35474
Peça 12	4,34934	4,34939	4,34939	4,34939	4,34939

Ensaio de Tração V20 R60 TR3 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod Elástico. (MPa)
CP1:	868	867	8	8	34	33	468
CP2:	882	881	8	8	34	33	471
CP3:	893	892	9	9	34	34	474
CP4:	891	889	9	9	34	34	474
CP5:	866	864	8	8	33	33	443
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	879,8	878,5	8,556	8,487	33,74	33,69	466,4
Mediana	881,7	880,8	8,493	8,426	33,52	33,49	471,5
Desv. Padrão	12,40	12,57	0,2045	0,2017	0,3705	0,3714	13,14
Coef. Var. (%)	1,410	1,431	2,390	2,376	1,098	1,102	2,818
Mínimo	865,6	864,1	8,338	8,271	33,40	33,34	443,3
Máximo	892,6	891,7	8,860	8,787	34,19	34,12	474,5

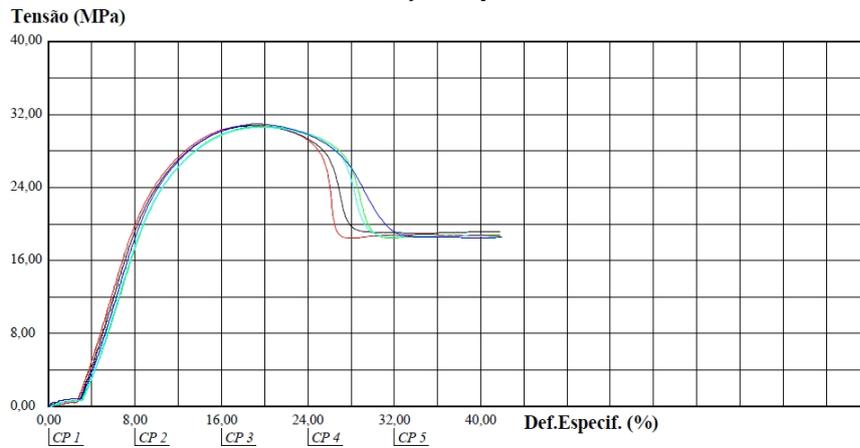
Tensão x Deformação Especifica V20 R60 TR3 EI.



Ensaio de Tração V20 R60 TR3 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1:	796	*	11	*	31	*	394
CP2:	790	*	11	*	31	*	394
CP3:	798	*	12	*	31	*	379
CP4:	802	*	12	*	31	*	383
CP5:	802	*	12	*	31	*	387
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	797,6	*	11,53	*	30,79	*	387,3
Mediana	798,0	*	11,57	*	30,79	*	386,5
Desv.Padrão	4,665	*	0,2551	*	0,1280	*	6,750
Coef.Var.(%)	0,5849	*	2,212	*	0,4159	*	1,743
Mínimo	790,5	*	11,24	*	30,62	*	378,7
Máximo	801,7	*	11,84	*	30,95	*	394,3

Tensão x Deformação Especifica V20 R60 TR3 LS.



Apêndice 6 - Resultados complementares do experimento 20/60/5

Massa do Experimento 20/60/5

$$V = 20 / R = 60 / TR = 5 / \text{Hrs} = 15:56$$

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,46805	4,46806	4,46806	4,46806	4,46806
Peça 02	4,44719	4,44686	4,44686	4,44686	4,44686
Peça 03	4,44933	4,44962	4,44962	4,44962	4,44962
Peça 04	4,44572	4,44574	4,44574	4,44574	4,44574
Peça 05	4,45733	4,45767	4,45767	4,45767	4,45767
Peça 06	4,45343	4,45367	4,45367	4,45367	4,45367
Peça 07	4,44899	4,44911	4,44911	4,44911	4,44911
Peça 08	4,44425	4,44431	4,44431	4,44431	4,44431
Peça 09	4,45512	4,45532	4,45532	4,45532	4,45532
Peça 10	4,45013	4,45024	4,45024	4,45024	4,45024
Peça 11	4,45448	4,45439	4,45439	4,45439	4,45439
Peça 12	4,44382	4,44386	4,44386	4,44386	4,44386

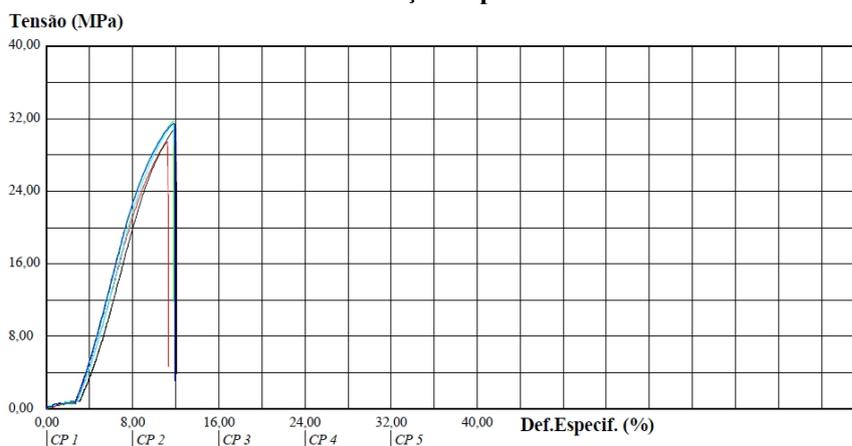
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,41778	4,41797	4,41797	4,41797	4,41797
Peça 02	4,40558	4,40595	4,40595	4,40595	4,40595
Peça 03	4,39062	4,39066	4,39066	4,39066	4,39066
Peça 04	4,40545	4,40537	4,40537	4,40537	4,40537
Peça 05	4,39103	4,39163	4,39163	4,39163	4,39163
Peça 06	4,41134	4,41129	4,41129	4,41129	4,41129
Peça 07	4,40532	4,40541	4,40541	4,40541	4,40541
Peça 08	4,39919	4,39922	4,39922	4,39922	4,39922
Peça 09	4,37901	4,37833	4,37833	4,37833	4,37833
Peça 10	4,39262	4,39271	4,39271	4,39271	4,39271
Peça 11	4,40274	4,40272	4,40272	4,40272	4,40272
Peça 12	4,39900	4,39898	4,39898	4,39898	4,39898

Ensaio de Tração V20 R60 TR5 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1	775	773	7	7	29	29	440
CP2	808	805	7	7	31	31	450
CP3	830	828	7	7	32	32	458
CP4	818	816	7	7	31	31	454
CP5	826	826	7	7	31	31	459
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	811,5	809,6	7,042	6,996	31,03	30,95	452,0
Mediana	817,8	815,7	7,086	7,030	31,47	31,40	453,7
Desv. Padrão	22,02	22,49	0,1748	0,1799	0,9263	0,9406	7,974
Coef.Var.(%)	2,713	2,778	2,483	2,571	2,986	3,039	1,764
Mínimo	775,3	772,7	6,742	6,686	29,45	29,36	439,6
Máximo	830,3	827,7	7,201	7,140	31,77	31,68	459,0

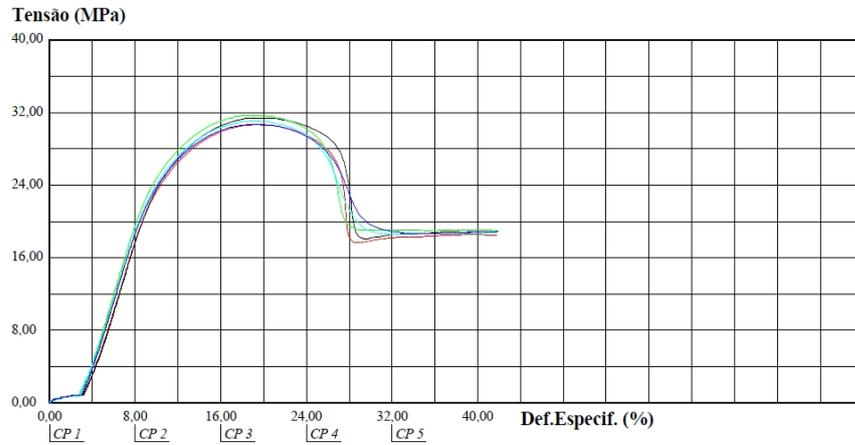
Tensão x Deformação Especifica V20 R60 TR5 EI.



Ensaio de Tração V20 R60 TR5 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1	811	*	12	*	31	*	387
CP2	815	*	12	*	31	*	393
CP3	814	*	11	*	32	*	397
CP4	810	*	11	*	31	*	388
CP5	809	*	11	*	31	*	391
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	812,0	*	11,52	*	31,12	*	391,4
Mediana	811,5	*	11,43	*	31,06	*	390,7
Desv.Padrão	2,513	*	0,2262	*	0,4559	*	4,156
Coef.Var.(%)	0,3095	*	1,964	*	1,465	*	1,062
Mínimo	809,1	*	11,29	*	30,68	*	387,3
Máximo	815,1	*	11,87	*	31,72	*	397,5

Tensão x Deformação Especifica V20 R60 TR5 LS.



Apêndice 7 - Resultados complementares do experimento 20/40/3

Massa do Experimento 20/40/3

$$V = 20 / R = 40 / TR = 3 / \text{Hrs} = 15:56$$

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,34981	4,34988	4,34988	4,34988	4,34988
Peça 02	4,34540	4,34544	4,34544	4,34544	4,34544
Peça 03	4,35390	4,35426	4,35426	4,35426	4,35426
Peça 04	4,33850	4,33877	4,33877	4,33877	4,33877
Peça 05	4,34078	4,34069	4,34069	4,34069	4,34069
Peça 06	4,33675	4,33698	4,33698	4,33698	4,33698
Peça 07	4,34262	4,34269	4,34269	4,34269	4,34269
Peça 08	4,34003	4,34009	4,34009	4,34009	4,34009
Peça 09	4,34348	4,34352	4,34352	4,34352	4,34352
Peça 10	4,34738	4,34733	4,34733	4,34733	4,34733
Peça 11	4,35586	4,35587	4,35587	4,35587	4,35587
Peça 12	4,35202	4,35209	4,35209	4,35209	4,35209

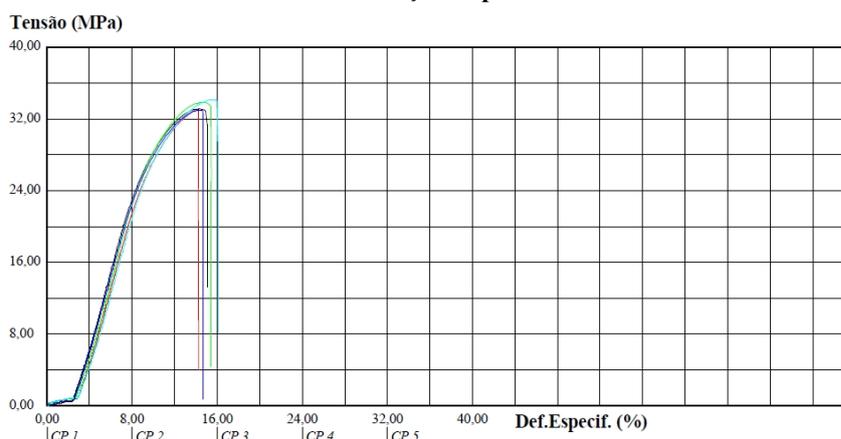
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,25638	4,25644	4,25644	4,25644	4,25644
Peça 02	4,26911	4,26903	4,26903	4,26903	4,26903
Peça 03	4,27211	4,27208	4,27208	4,27208	4,27208
Peça 04	4,27672	4,27676	4,27676	4,27676	4,27676
Peça 05	4,27276	4,27279	4,27279	4,27279	4,27279
Peça 06	4,29376	4,29368	4,29368	4,29368	4,29368
Peça 07	4,25909	4,25920	4,25920	4,25920	4,25920
Peça 08	4,26308	4,26307	4,26307	4,26307	4,26307
Peça 09	4,27747	4,27729	4,27729	4,27729	4,27729
Peça 10	4,26865	4,26858	4,26858	4,26858	4,26858
Peça 11	4,25706	4,25707	4,25707	4,25707	4,25707
Peça 12	4,28363	4,28372	4,28372	4,28372	4,28372

Ensaio de Tração V20 R40 TR3 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1:	859	858	9	8	33	33	445
CP2:	855	851	9	9	33	33	444
CP3:	875	867	9	9	34	34	457
CP4:	884	882	9	10	34	34	443
CP5:	862	861	9	9	33	33	440
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	866,9	863,9	8,785	8,976	33,45	33,34	446,0
Mediana	862,0	861,2	8,658	8,893	33,15	33,11	444,4
Desv.Padrão	11,90	11,76	0,3295	0,3908	0,5149	0,4873	6,580
Coef.Var.(%)	1,373	1,361	3,751	4,354	1,539	1,462	1,475
Mínimo	854,9	850,8	8,553	8,486	32,99	32,96	440,3
Máximo	883,5	882,0	9,360	9,515	34,14	34,08	457,3

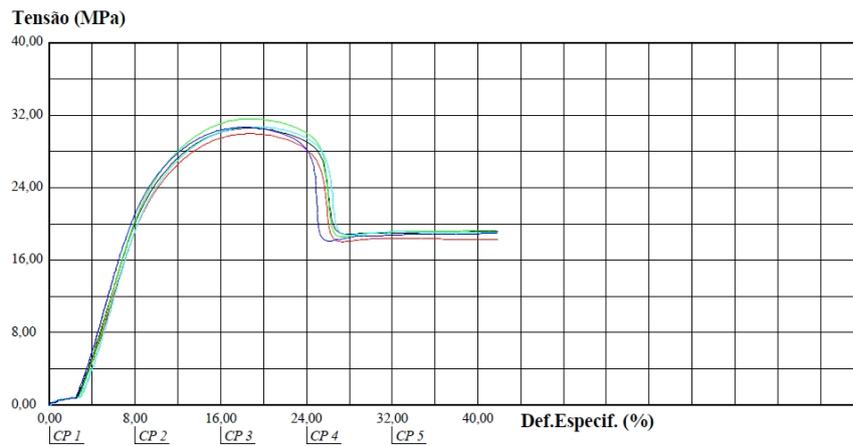
Tensão x Deformação Especifica V20 R40 TR3 EI.



Ensaio de Tração V20 R40 TR3 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1	791	*	11	*	30	*	382
CP2	794	*	11	*	31	*	394
CP3	802	*	11	*	32	*	411
CP4	796	*	11	*	31	*	406
CP5	796	*	11	*	31	*	413
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	795,8	*	11,19	*	30,73	*	401,5
Mediana	795,6	*	11,20	*	30,69	*	406,4
Desv.Padrão	4,031	*	0,1828	*	0,5828	*	13,16
Coef.Var.(%)	0,5066	*	1,635	*	1,896	*	3,278
Mínimo	790,8	*	10,93	*	29,99	*	382,1
Máximo	801,9	*	11,42	*	31,62	*	413,4

Tensão x Deformação Especifica V20 R40 TR3 LS.



Apêndice 8 - Resultados complementares do experimento 20/40/5

Massa do Experimento 20/40/5

$$V = 20 / R = 40 / TR = 5 / \text{Hrs} = 15:56$$

Corpo de Prova - Entrada de Injeção

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,42584	4,42580	4,42580	4,42580	4,42580
Peça 02	4,40744	4,40722	4,40722	4,40722	4,40722
Peça 03	4,39553	4,39543	4,39543	4,39543	4,39543
Peça 04	4,40142	4,40135	4,40135	4,40135	4,40135
Peça 05	4,40234	4,40229	4,40229	4,40229	4,40229
Peça 06	4,41892	4,41928	4,41928	4,41928	4,41928
Peça 07	4,40696	4,40697	4,40697	4,40697	4,40697
Peça 08	4,40058	4,40058	4,40058	4,40058	4,40058
Peça 09	4,39769	4,39764	4,39764	4,39764	4,39764
Peça 10	4,41681	4,41714	4,41714	4,41714	4,41714
Peça 11	4,40829	4,40814	4,40814	4,40814	4,40814
Peça 12	4,40844	4,40850	4,40850	4,40850	4,40850

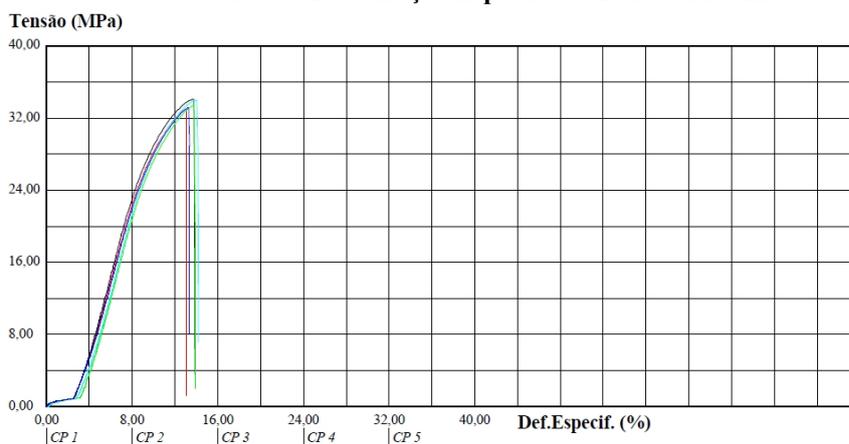
Corpo de Prova - Linda de Solda

	1º ciclo	2º Ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
Peça 01	4,31508	4,31514	4,31514	4,31514	4,31514
Peça 02	4,30786	4,30822	4,30822	4,30822	4,30822
Peça 03	4,30269	4,30274	4,30274	4,30274	4,30274
Peça 04	4,29376	4,29381	4,29381	4,29381	4,29381
Peça 05	4,31260	4,31314	4,31314	4,31314	4,31314
Peça 06	4,30844	4,30850	4,30850	4,30850	4,30850
Peça 07	4,31877	4,31878	4,31878	4,31878	4,31878
Peça 08	4,30862	4,30859	4,30859	4,30859	4,30859
Peça 09	4,31226	4,31226	4,31226	4,31226	4,31226
Peça 10	4,30993	4,30989	4,30989	4,30989	4,30989
Peça 11	4,30347	4,30339	4,30339	4,30339	4,30339
Peça 12	4,30400	4,30404	4,30404	4,30404	4,30404

Ensaio de Tração V20 R40 TR5 EI.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1:	855	855	8	8	33	33	446
CP2:	881	881	8	8	34	34	460
CP3:	872	870	8	8	33	33	461
CP4:	879	879	8	8	34	34	461
CP5:	856	855	8	8	33	33	445
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	868,2	867,8	8,141	8,114	33,53	33,51	454,7
Mediana	871,8	870,4	8,210	8,210	33,45	33,40	460,5
Desv. Padrão	12,44	12,57	0,2256	0,2289	0,4920	0,5005	8,326
Coef.Var.(%)	1,433	1,449	2,771	2,821	1,468	1,494	1,831
Mínimo	854,5	854,5	7,835	7,835	32,96	32,96	445,0
Máximo	880,6	880,6	8,383	8,383	34,08	34,08	461,0

Tensão x Deformação Especifica V20 R40 TR5 EI.



Ensaio de Tração V20 R40 TR5 LS.

Corpo de Prova	Força @Força Max. (N)	Força @Ruptura (N)	Deformação @Força Max. (mm)	Deformação @Ruptura (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP1:	784	*	11	*	31	*	385
CP2:	797	*	11	*	31	*	399
CP3:	799	*	11	*	31	*	392
CP4:	799	*	11	*	31	*	398
CP5:	789	*	11	*	31	*	391
Número CPs	5	0	5	0	5	0	5
Média	793,4	*	11,19	*	30,97	*	393,1
Mediana	796,8	*	11,13	*	30,91	*	392,3
Desv.Padrão	6,888	*	0,09978	*	0,3020	*	5,524
Coef.Var.(%)	0,8681	*	0,8917	*	0,9753	*	1,405
Mínimo	783,8	*	11,11	*	30,59	*	385,3
Máximo	799,3	*	11,34	*	31,39	*	398,9

Tensão x Deformação Especifica V20 R40 TR5 LS.

