

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

ESTUDO COMPARATIVO E EXPERIMENTAL DE MATERIAIS
APLICADOS A INSERTOS MACHO DE MOLDES DE INJEÇÃO
DENTRO DO CONCEITO DE MOLDE HÍBRIDO

DEIVES ROBERTO BARETA

Caxias do Sul

2007

DEIVES ROBERTO BARETA

ESTUDO COMPARATIVO E EXPERIMENTAL DE MATERIAIS APLICADOS A
INSERTOS MACHO DE MOLDES DE INJEÇÃO DENTRO DO CONCEITO DE MOLDE
HÍBRIDO.

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em
Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências
dos Materiais.

Orientador: Prof. Carlos Alberto Costa, Ph.D.

Co-orientador: Prof. Dr. Israel Jacob Rabin Baumvol.

Caxias do Sul

2007

**“Estudo experimental comparativo de materiais
aplicados a insertos macho de moldes de injeção
dentro do conceito de Molde Híbrido”**

Deives Roberto Baretta

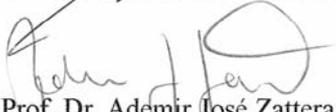
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Área de Concentração: Processamento e Simulação de Materiais.

Caxias do Sul, 17 de abril de 2007.

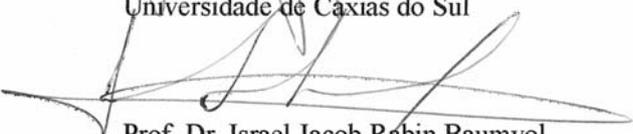
Banca Examinadora:



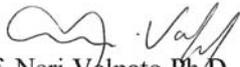
Prof. Carlos Alberto Costa Ph.D. (Orientador)
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Ademir José Zattera
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Israel Jacob Rabin Baumvol
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Neri Volpato Ph.D.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho e, em particular:

A Deus, por ter-me concedido às oportunidades possíveis para que eu pudesse alcançar os meus objetivos.

Ao meu orientador, colega e grande amigo Carlos Alberto Costa, a quem expresso o mais profundo agradecimento por ter acreditado e me incentivado em todos os momentos.

Ao amigo Professor António Sérgio Pouzada, quem primeiro me apontou o "caminho das pedras" como objeto para esta dissertação e por acreditar no meu trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelo olhar crítico e competente, cujas contribuições e sugestões foram importantes para o aperfeiçoamento deste trabalho.

À Professora Jovita de Oliveira, da Universidade do Minho, pela realização das micrografias.

Ao Professor Israel Baumvol e sua equipe do Instituto de Física da *UFRGS* pelas análises de RBS.

Aos amigos e colegas de “corneta” e de almoço, Robinson, Kléber, Malu, Zeilmann, Stevanatto, Rossi, e Wander. Esses dois últimos também pela contribuição científica para esse trabalho.

Aos amigos e colegas do mestrado pelo companheirismo, em especial: Jadna, Helena, Tatiana, Felipa, Marcelo, Juliano e, um agradecimento muito mais que especial ao colega Gerson por todos os "galhos quebrados" na realização desse trabalho.

Aos ex-bolsistas do Grupo de Injeção e Ferramental Rápido, Tiago e Gustavo pela ajuda nos ensaios.

As gurias da secretaria do *Bloco V*, Rose, Lu, Ivani e Cris por toda a ajuda e simpatia disponibilizada.

A nossa secretária do Programa de Mestrado, Marga pela eficiência e dedicação.

A empresa *Aral Sul*, na pessoa do Sr. Sérgio pela doação das resinas *Huntsman*.

A empresa *Unitec*, na pessoa do meu amigo Rodrigo Bueno, pelo empréstimo do termoregulador.

*Dedico este trabalho a minha família,
em especial aos meus pais, que com
sacrifício e empenho, foram os
responsáveis pela minha educação.*

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS	21
2.2.1 <i>Generalidades</i>	21
2.2.2 <i>Morfologia cristalina dos polímeros</i>	22
2.2.3 <i>Fatores que alteram a cristalinidade</i>	25
2.2.4 <i>Efeitos das condições de processamento na cristalinidade</i>	25
2.2.5 <i>Efeitos da cristalinidade nas propriedades do produto final</i>	28
2.3 PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	29
2.4 MOLDES DE INJEÇÃO	30
2.4.1 <i>Materiais envolvidos no projeto de um molde</i>	32
2.4.2 <i>Variáveis importantes na injeção de polímeros</i>	35
2.4.3 <i>Simulação numérica de processos de injeção</i>	37
2.5 PROTOTIPAGEM RÁPIDA E FERRAMENTAL RÁPIDO	38
2.6 MOLDES DE INJEÇÃO HÍBRIDOS	42
2.6.1 <i>Materiais usados no conceito de Moldes Híbridos</i>	43
2.6.2 <i>Viabilidade econômica no uso de Moldes Híbridos</i>	44
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	47
3.1 INTRODUÇÃO	47
3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O EXPERIMENTO	47
3.3 MOLDE DE INJEÇÃO EXPERIMENTAL	48

3.3.1	<i>Concepção e projeto</i>	48
3.3.2	<i>Instrumentação do molde</i>	51
3.4	GEOMETRIA DO COMPONENTE INJETADO E POLÍMERO ESTUDADO	53
3.5	VARIÁVEIS DE ANÁLISE PARA O EXPERIMENTO	54
3.6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL.....	56
3.6.1	<i>Definição de parâmetros</i>	56
3.6.2	<i>Configuração da máquina de injeção com os valores simulados</i>	61
3.7	COLETA DE AMOSTRAS.....	63
3.8	TÉCNICAS ADOTADAS PARA A CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS	65
3.8.1	<i>Condicionamento dos corpos-de-prova</i>	65
3.8.2	<i>Ensaio mecânicos</i>	65
3.8.3	<i>Medições dimensionais e de rugosidade</i>	68
3.8.4	<i>Análise Térmica – Método da Capacitância Global</i>	69
3.8.5	<i>Calorimetria Diferencial de Varredura</i>	71
3.8.6	<i>Microscopia óptica</i>	73
3.8.7	<i>Espectrometria de Retroespalhamento Rutherford</i>	73
3.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1	INTRODUÇÃO.....	77
4.2	ANÁLISE TÉRMICA DO MOLDE	77
4.2.1	<i>Análise térmica do macho de AISI P20</i>	78
4.2.2	<i>Análise térmica do macho de Resina</i>	80
4.2.3	<i>Análise térmica – Alumínio e Zamak</i>	82
4.2.4	<i>Conclusões sobre a análise térmica</i>	84
4.3	MORFOLOGIA	85
4.3.1	<i>Morfologia das peças injetadas sobre o macho de AISI P20</i>	85
4.3.2	<i>Morfologia das peças injetadas sobre o macho de Resina</i>	86
4.3.3	<i>Morfologia das peças injetadas sobre o macho de Alumínio</i>	87
4.3.4	<i>Morfologia das peças injetadas sobre o macho de Zamak</i>	88
4.4	CRISTALINIDADE.....	89
4.5	ANÁLISES MECÂNICAS.....	90
4.5.1	<i>Ensaio de resistência à tração</i>	91
4.5.2	<i>Ensaio de resistência ao impacto</i>	92

4.5.3	<i>Considerações sobre a morfologia e cristalinidade com as propriedades mecânicas</i>	95
4.6	ANÁLISES DIMENSIONAIS.....	96
4.7	ASPECTOS VISUAIS.....	101
4.8	DESGASTE DO FERRAMENTAL E CONTAMINAÇÃO POR METAIS	104
4.8.1	<i>Análise de contaminação através de RBS</i>	104
4.8.2	<i>Desgaste do ferramental</i>	107
4.9	ESTUDO DOS CUSTOS DE FABRICAÇÃO DOS INSERTOS E DO USO DE FERRAMENTAL RÁPIDO	109
4.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	111
5.1	INTRODUÇÃO.....	111
5.2	CONCLUSÕES.....	112
5.2.1	<i>Conclusões gerais</i>	112
5.2.2	<i>Conclusões específicas</i>	113
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	ANEXOS	123
	ANEXO 1 PROJETO DO INSERTO MACHO	124
	ANEXO 2 SIMULAÇÃO MATEMÁTICA COMPUTACIONAL	128
	ANEXO 3 ESTUDO DE RUGOSIDADE E ANÁLISE DIMENSIONAL	141
	ANEXO 4 ENSAIO DE DSC	152

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - MICROGRAFIA ELETRÔNICA DE UMA AMOSTRA DE POLIETILENO LINEAR	24
FIGURA 2 – CRUZ DE MALTA OBSERVADA POR MICROGRAFIA ÓTICA	24
FIGURA 3 - VARIAÇÕES NA CRISTALIZAÇÃO DA ESPESSURA DE PAREDE DE UM PRODUTO EM UM MOLDE REFRIGERADO	27
FIGURA 4– REPRESENTAÇÃO GENÉRICA DE UM MOLDE DE INJEÇÃO (EM CORTE)	32
FIGURA 5- PROCESSO DE OBTENÇÃO DE CAVIDADES EM RESINA EPOXÍDICA	42
FIGURA 6 - CÉLULA DE INJEÇÃO USADA	48
FIGURA 7 - MOLDE EXPERIMENTAL, JUNTAMENTE COM SUAS CAVIDADES INTERCAMBIÁVEIS	49
FIGURA 8 - MOLDE EXPERIMENTAL EM CORTE	49
FIGURA 9 - ALGUMAS ETAPAS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DO INSERTO MACHO EM RESINA EPÓXI.....	51
FIGURA 10 - POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES	52
FIGURA 11 - PRODUTO ESTUDADO	54
FIGURA 12 - MODELO EM CAD3D DA PEÇA ESTUDADA.....	56
FIGURA 13 - MODELO SIMULADO NO MOLDFLOW.....	57
FIGURA 14 - SIMULAÇÃO DE PRESSÃO DE INJEÇÃO DA CONFIGURAÇÃO AISI P20 A 30°C.....	59
FIGURA 15 - LINHAS DE SOLDA NA CONFIGURAÇÃO AISI P20 A 30°C	59
FIGURA 16 - SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA NA FRENTE DE FLUXO NA CONFIGURAÇÃO AISI P20 A 30°C.....	60
FIGURA 17 - SIMULAÇÃO DE TEMPO DE PREENCHIMENTO DA CONFIGURAÇÃO AISI P20 A 30°C	60
FIGURA 18 - GRÁFICO DE PRESSÃO X TEMPO DE CICLO DA CONFIGURAÇÃO AISI P20 A 30°C.....	61
FIGURA 19 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	66
FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO	66
FIGURA 21 - ENSAIO DE IMPACTO.....	67
FIGURA 22 - REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO.....	68
FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM REGIME TRANSIENTE PARA DIFERENTE NÚMERO DE BIOT EM UMA PAREDE PLANA RESFRIADA SIMETRICAMENTE POR CONVECÇÃO.....	70
FIGURA 24 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA ANÁLISES DE DSC	72
FIGURA 25- LOCAL DE RETIRADA DAS AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA.....	73
FIGURA 26 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE RETROESPALHAMENTO DE PARTÍCULAS	75
FIGURA 27 - ANÁLISE TÉRMICA DO CICLO DE INJEÇÃO SOBRE O MACHO DE AISI P20.....	78
FIGURA 28 - ANÁLISE TÉRMICA DO CICLO DE INJEÇÃO SOBRE O MACHO DE RESINA NA TEMPERATURA DE 30°C... 80	
FIGURA 29 - ANÁLISE TÉRMICA DO CICLO DE INJEÇÃO SOBRE O MACHO DE RESINA NA TEMPERATURA DE 50°C... 81	
FIGURA 30 - ANÁLISE TÉRMICA DO CICLO DE INJEÇÃO SOBRE O MACHO DE RESINA NA TEMPERATURA DE 70°C... 81	
FIGURA 31 - ANÁLISE TÉRMICA DO CICLO DE INJEÇÃO SOBRE O MACHO DE ALUMÍNIO.....	83
FIGURA 32 - ANÁLISE TÉRMICA DO CICLO DE INJEÇÃO SOBRE O MACHO DE ZAMAK	83
FIGURA 33 - MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS INJETADAS SOBRE O MACHO DE AISI P20.....	86
FIGURA 34 - MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS INJETADAS SOBRE O MACHO DE RESINA	87
FIGURA 35 - MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS INJETADAS SOBRE O MACHO DE ALUMÍNIO.....	88
FIGURA 36 - MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS INJETADAS SOBRE O MACHO DE ZAMAK	89
FIGURA 37- COMPARATIVO ENTRE AS CONFIGURAÇÕES NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	92

FIGURA 38- COMPARATIVO ENTRE AS CONFIGURAÇÕES NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO	94
FIGURA 39 - PERCENTUAL DE CONTRAÇÃO NA MEDIDA DA ALTURA DA PEÇA	98
FIGURA 40 - PERCENTUAL DE CONTRAÇÃO NA MEDIDA DO DIÂMETRO DE 60MM	99
FIGURA 41 - PERCENTUAL DE CONTRAÇÃO NA MEDIDA DO DIÂMETRO DE 63MM	100
FIGURA 42 - PERCENTUAL DE CONTRAÇÃO NA MEDIDA DA ESPESSURA	101
FIGURA 43 - REBARBAS NAS PEÇAS INJETADAS SOBRE O MACHO DE AISI P20	103
FIGURA 44 - FALHA NO PREENCHIMENTO DA PEÇA.....	103
FIGURA 45 - REBARBAS NAS PEÇAS INJETADAS SOBRE O MACHO DE RESINA	104
FIGURA 46 – ESPECTRO OBTIDO POR RBS, CONFIGURAÇÃO AISI P20	105
FIGURA 47 – ESPECTRO OBTIDO POR RBS, CONFIGURAÇÃO RESINA	105
FIGURA 48 – ESPECTRO OBTIDO POR RBS, CONFIGURAÇÃO ALUMÍNIO	106
FIGURA 49 – ESPECTRO OBTIDO POR RBS, CONFIGURAÇÃO DE ZAMAK.....	106
FIGURA 50 - LASCAMENTO DA BORDA	108
FIGURA 51 - DEGRADAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MACHO DE RESINA	108

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE FERRAMENTAL RÁPIDO CLASSIFICADOS PELA VIA DE OBTENÇÃO.....	40
TABELA 2 - VALOR E PRAZO DE ENTREGA DE UM MOLDE DE INJEÇÃO DE DUAS CAVIDADES, QUATRO PINOS EXTRATORES E DUAS GAVETAS	45
TABELA 3 - GRAU DE INCERTEZA EXPERIMENTAL	53
TABELA 4 - CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS	55
TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DOS MATERIAIS USADOS	57
TABELA 6 - PARÂMETROS DE PROCESSO – SIMULAÇÃO X EXECUÇÃO	62
TABELA 7 - PARÂMETROS DE PROCESSOS VARIÁVEIS	62
TABELA 8 - AMOSTRAS E SEUS RESPECTIVOS ENSAIOS	64
TABELA 9 - AMPLITUDE TÉRMICA NA ANÁLISE DE AISI P20.....	79
TABELA 10 - AMPLITUDE TÉRMICA NA ANÁLISE DE RESINA.....	82
TABELA 11 - AMPLITUDE TÉRMICA NA ANÁLISE DE ALUMÍNIO E ZAMAK	84
TABELA 12 - CÁLCULO DO NÚMERO DE BIOT	84
TABELA 13 - GRAU DE CRISTALINIDADE DAS AMOSTRAS	89
TABELA 14 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	91
TABELA 15 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	92
TABELA 16 - REDUÇÃO, EM RELAÇÃO ÀS AMOSTRAS INJETADAS SOBRE O MACHO DE AÇO AISI P20, DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO	94
TABELA 17 - RESUMO DAS DIMENSÕES	97
TABELA 18 - ASPECTOS VISUAIS DAS PEÇAS OBTIDAS	102
TABELA 19 - QUANTIDADE DE ENERGIA MEDIDA PARA CADA ELEMENTO NA ANÁLISE DE RBS	104
TABELA 20 - CUSTOS E TEMPO DE PRODUÇÃO	109

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ΔH_f	Calor de fusão do polímero
ΔH_f°	Calor de fusão de um polímero hipoteticamente 100% cristalino
3DP	3D Printers
ABS	acrilonitrila-butadieno-estireno
ACES	<i>Accurate Clear Epoxy Solid</i>
AISI	American Iron and Steel Institute
Bi	Número de Biot
CAD	Projeto auxiliado por computador
CAE	Engenharia auxiliado por computador
CAM	Manufatura auxiliada por computador
CLP	Central lógica programável
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Direct AIM	<i>ACES Injection Moulding</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
E_f	Força de fechamento
EP	Moldes de resina carregada
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição de Material (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
FEM	Método dos elementos finitos
h	Coefficiente convectivo do meio ou material
k	Coefficiente condutivo do material
K	Fator cinemático nas análises RBS
L_c	Dimensão característica nas análises térmicas
L_M	Comprimento útil na medição de rugosidade
LOM	Manufatura de Objetos em Lâminas (<i>Laminated Object Manufacturing</i>)
L_T	Comprimento total na medição de rugosidade
MPI	<i>Mold Flow Plastic Inside</i>
PE	polietileno
P_i	Pressão de injeção
POM	polioximetileno ou poliacetal
PP	polipropileno
ppm	Partes por milhão
P_r	Pressão de recalque
PU	poliuretano

PVC	poli(cloreto de vinila)
RBS	Espectrometria de Retroespalhamento Rutherford
RP	Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
RT	Ferramental Rápido (<i>Rapid Tooling</i>)
SL	Estereolitografia (<i>Stereolithography</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering</i>)
SLSm	Sinterização por Laser de Metais
T_{CM}	Temperatura da cavidade do molde
T_G	Temperatura de transição vítrea
T_I	Temperatura do canhão
T_M	Temperatura de fusão
v_I	Velocidade de injeção
λ_c	Comprimento da amostragem (<i>cut-off</i>)

RESUMO

BARETA, Deives Roberto. Estudo comparativo e experimental de materiais aplicados a insertos macho de moldes de injeção dentro do conceito de Molde Híbrido, 2007, 148p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) Programa de Pós-Graduação em Materiais, UCS, Caxias do Sul.

O uso de componentes injetados de plástico aumentou nos últimos anos na maioria dos segmentos industriais. Como resultado, os processos envolvidos no projeto e na fabricação de moldes de injeção ganharam uma significativa atenção devido a grande complexidade, necessidade de baixo custo e, principalmente, curto tempo de manufatura. O uso de técnicas de Prototipagem e Ferramental Rápido (*Rapid Prototyping/Rapid Tooling*) surgiram como opções para esse setor, visando à rápida obtenção de peças protótipos. Porém, um dos desafios ainda presente está em garantir que as peças protótipos resultantes dessas técnicas atendam todas as dimensões solicitadas em aplicações reais. Este trabalho aborda a aplicação de materiais alternativos para a fabricação de moldes híbridos de injeção, dentro do conceito de Ferramental Rápido, com o objetivo de contribuir para uma melhor compreensão da influência desses materiais na qualidade final das peças protótipos obtidas. Um molde experimental, instrumentalizado com sensores de temperatura e, com uma das cavidades intercambiável, foi projetado e manufaturado para a injeção de uma peça de referência. As diferentes propriedades dos materiais utilizados na cavidade intercambiável, principalmente as propriedades térmicas, foram analisadas, bem como a influência dessas no produto final. Doze configurações diferentes (material da cavidade – temperatura do molde) foram definidas para a obtenção de amostras. O experimento foi definido com o apoio de simulação matemática computacional. As amostras obtidas foram analisadas com relação as suas propriedades mecânicas (resistência ao impacto e à tração), propriedades físicas (dimensionamento, estudo morfológico e de cristalinidade) e propriedades químicas onde o grau de contaminação por metais pesados foi avaliado. As conclusões obtidas nesse trabalho mostram a importância da influência do material da cavidade do molde, e apresentam uma correlação das diferentes variáveis de processo com as propriedades obtidas nas peças protótipos injetadas através de técnica de Ferramental Rápido.

Palavras-chave: ferramental rápido, moldes híbridos.

ABSTRACT

The application of plastic components has grown significantly in most of industrial segments during last years. This has attracted considerably attention for the injection mould design and manufacturing processes, which is one of the most expensive phases of injected plastic components development process. Techniques such as Rapid Prototyping/Rapid Tooling have appeared as potential solution in the field. However, one issue not resolved is how the prototypes obtained by these techniques can attend all features demanded by a true prototype. This research explores the application of softer alternative material to hybrid prototype injection moulds within the concept of rapid tooling, providing a better understanding about the influence of these materials in the final properties of plastic injected prototypes. An experimental injection mould, assembled with temperature sensors, and with interchangeability of the moulding blocks (core and cavity) has been designed and manufactured based on a tubular reference component. The different properties of the core materials, in special thermal, have been analyzed, as well as their influence on the reference component. A set of twelve configurations (core material – mould temperature) have been defined to obtain the samples. Mathematical computational simulation was used to identify the more appropriate injection moulding parameters. The final samples have been analyzed in terms of mechanical properties (stress-strain and impact), physical properties (dimensions, morphology and crystallinity) and chemical properties. The conclusions show the influence of alternative materials, applied to core injection mould, on the final injected components. Also, a relationship between the different injection moulding parameters and the final prototype component properties are discussed.

Keywords: rapid tooling, hybrids molds.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do problema

Atualmente, as empresas buscam constantemente diferenciar seu produto, tanto em seu processo de desenvolvimento como na concepção do produto final, visando se tornarem competitivas no mercado consumidor. Além desta diferenciação, procuram constantemente reduzir o tempo de introdução do seu produto no mercado, conhecido como *time-to-market*.

As empresas da indústria de moldes e plásticos estão intimamente associadas a esta realidade através da necessidade de oferecer soluções de projeto integradas em ciclos de concepção e desenvolvimento global. A exploração de metodologias alternativas para a concepção e fabricação de ferramentas de produção de protótipos passam pela aplicação das potencialidades oferecidas pelas técnicas de prototipagem rápida e pela utilização de materiais novos e/ou alternativos para as superfícies das cavidades [1].

A criação de ferramentas para protótipos e produção de componentes de plástico representa uma das fases mais caras e de maior consumo de tempo, no desenvolvimento de novos produtos. É também particularmente problemática para produtos de baixo volume de produção, ou produtos de alto volume e rápidas mudanças. Somado a isso, a complexidade de alguns produtos que implica na complexidade também do ferramental, só faz aumentar seu tempo de fabricação e seu custo final, devido ao alto grau de engenharia necessária para a concepção do molde.

Uma opção até então eficaz no sentido de permitir a obtenção, em curto espaço de tempo, de protótipos em massa, é através das técnicas de Ferramental Rápido. Contudo, essas técnicas ainda carecem de maiores estudos quanto às propriedades mecânicas e características finais que esses protótipos oferecerão, em relação às peças obtidas pelos processos convencionais de moldes de injeção.

Nas diferentes tecnologias de fabricação rápida de moldes, um dos fatores de maior importância e comum a todas elas, é a utilização de materiais e/ou técnicas alternativas nas partes moldantes. Isto porque, estas são as partes que demandam maior tempo de fabricação e maior custo, justamente por ser a região que dá forma ao produto. Para isso, nesse trabalho, como será justificado no próximo subitem e, apresentado ao longo desse trabalho, as influências de materiais alternativos, usualmente adotados nesse contexto, serão abordadas e relacionadas com as propriedades finais do produto injetado.

1.2 Justificativa

A serra gaúcha está inserida dentre os principais pólos metal-mecânico do país, sendo grande a concentração de empresas especializadas na fabricação de moldes ou ferramentais para injeção de plásticos nesta região. Apesar do alto nível de desenvolvimento deste setor nesta região, ainda encontra-se em fase inicial o estudo e a utilização das técnicas de fabricação rápida de moldes, especialmente em comparação com outros países. Por isso, este trabalho tem a finalidade de contribuir para o desenvolvimento desta tecnologia no setor de moldes de injeção para plásticos, e, além disso, pretende despertar o interesse neste assunto, sendo um estímulo a novos pesquisadores desta área, e ajudando a inserir a “cultura” de moldes rápidos na região.

O trabalho aborda um experimento com insertos macho de três materiais metálicos diferentes (AISI P20, Alumínio 7075-T6 e, Zamak-5), além de uma resina epoxídica comercial (RenCast® 436). As peças obtidas no conjunto macho e fêmea de aço AISI P20, nesse trabalho, são consideradas como um padrão de peça obtida por moldagem convencional de injeção, devido a esse material ser usualmente adotado nos moldes convencionais.

Preferiu-se modificar somente o material do inserto macho no experimento, mantendo a cavidade fêmea de aço AISI P20 para que houvesse uma maior percepção e entendimento da

influência dos materiais das cavidades nas paredes de congelamento das peças produzidas. Esse estudo pode ser visualizado no item 4.3 desse trabalho.

Como dito anteriormente, um estudo da influência dos materiais alternativos (Alumínio 7075-T6, Zamak-5, e RenCast® 436) no produto final foi feito, onde comparativamente as propriedades mecânicas, físicas e químicas desses protótipos foram relacionadas com essas mesmas propriedades das peças moldadas sobre o conjunto macho e fêmea padrão (aço AISI P20).

Em especial, vale aqui ressaltar a utilização de resinas reforçadas com cargas minerais ou metálicas (resinas epoxídicas com carga de alumínio, por exemplo) nos processos de produção de Ferramental Rápido. O uso desses materiais torna-se particularmente interessante na obtenção de ferramentas de injeção em que seria necessário aplicar intensivamente o processo de usinagem e eletroerosão. Os blocos moldantes são os componentes mais críticos no projeto de um molde. Além de apresentarem o formato do produto injetado, essas alojam o sistema de refrigeração, e eventualmente os pinos de extração, e são exemplos de peças que podem ser obtidas com o uso dessa técnica, em até mesmo uma única operação, reduzindo assim, significativamente o tempo de lançamento de um novo produto no mercado.

Contudo, uma questão a ser melhor entendida no uso dessas técnicas é o quanto que os materiais alternativos utilizados em molde-protótipo propiciam as mesmas características mecânicas, químicas e dimensionais nos componentes produzidos. Para isso, nesse trabalho, serão analisadas as influências de cada material nessas propriedades do produto injetado, tais como resistência à tração e impacto, morfologia cristalina, grau de cristalização, contaminação por metais, além do dimensionamento do produto final obtido.

1.3 Objetivos

Para desenvolver esse trabalho, foi determinado como objetivo geral: “analisar e avaliar as propriedades térmicas, mecânicas e químicas de componentes injetados em insertos

macho de materiais alternativos, para moldes de injeção, como por exemplo, resinas epoxídicas e ligas baseadas em alumínio e em zinco, comparando essas propriedades com as de peças injetadas em insertos macho de material convencional, no caso aço AISI P20”.

Para alcançar o objetivo geral, delinear-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os conceitos envolvidos com moldes de injeção, Ferramental Rápido, Prototipagem Rápida e Moldes Híbridos;
- Estudar e entender as características de peças injetadas em polímeros, bem como sua relação com as variáveis de processo;
- Desenvolver um molde experimental para aplicar os conceitos necessários para o projeto e confecção de moldes híbridos de injeção de termoplásticos e, propor uma geometria e o material polimérico para uma peça de referência para a parte experimental;
- Definir parâmetros pré-otimizados para moldagem por injeção de peça de referência em inserto de material convencional (aço AISI P20), e inserto de material alternativo (resina epoxídica);
- Fazer ensaios experimentais monitorados, acondicionando as amostras para as futuras análises;
- Analisar qualitativa e quantitativamente as peças de referência injetadas em insertos convencionais e nos insertos de material alternativo (contração, cristalinidade, linhas de solda, morfologia cristalina, propriedades mecânicas), além de condições de processamento;
- Analisar a durabilidade de um conjunto de insertos em resina epoxídica e fazer análise de “custo x benefício”, em relação a moldes convencionais.

Para atender a estes objetivos, esse trabalho foi constituído com uma revisão bibliográfica (Capítulo 2) sobre os seguintes temas: Materiais poliméricos, Processos de

transformação de polímeros, Moldes de injeção, Prototipagem e Ferramental Rápido e, Moldes híbridos de injeção. O Capítulo 3 apresenta o experimento realizado, com a descrição do molde, sua instrumentalização, a geometria e polímero analisado, simulação computacional, variáveis de análise, além das técnicas de caracterização adotadas. No Capítulo 4, serão discutidos os resultados obtidos, relacionando as propriedades mecânicas com a estrutura morfologia do polímero injetados sobre os diferentes materiais aplicados. E, por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais e específicas desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada para dar apoio ao entendimento dos conceitos envolvidos nesse trabalho. São apresentados os conceitos de materiais poliméricos, processos de transformação de polímeros, moldes de injeção, Prototipagem e Ferramental Rápido e, moldes híbridos de injeção.

Esse capítulo dá apoio aos dois primeiros objetivos específicos desse trabalho.

2.2 Materiais poliméricos

2.2.1 Generalidades

A palavra polímero origina-se de duas palavras gregas: *poli* (muitos) e *meros* (unidades de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por dezenas de milhares de unidades de repetição (meros). Este número de unidades de repetição é também chamado de grau de polimerização [2]. O monômero, ou molécula com uma (mono) unidade de repetição, é a matéria-prima para a produção de um polímero [3].

Os polímeros podem ser classificados segundo sua estrutura em três grupos: de cadeia linear, ramificada e de ligações cruzadas. Essencialmente, os polímeros lineares são longas cadeias formadas por muitos meros interligados linearmente. Polímeros lineares podem ser amolecidos termicamente e por isso podem ser chamados termoplásticos. Polímeros ramificados são os que possuem cadeias que crescem lateralmente à cadeia molecular principal. Estas ramificações podem variar em quantidade e tamanho. Estruturas de ligações cruzadas são aquelas em que duas ou mais cadeias principais são interligadas por cadeias laterais [2].

Tais polímeros, classificados como termorrígidos (ou termofixos), são o oposto dos

termoplásticos, pois iriam decompor-se ou queimar antes do amolecimento. Termorrígidos podem ser tanto líquidos quanto sólidos a temperatura ambiente, são colocados dentro de um molde e então aquecidos e curados, assim obtendo-se a forma e as propriedades desejadas [4]. Termoplásticos são polímeros que, sob o efeito de temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições [3-5]. Assim que retiradas estas solicitações, se solidificam adquirindo a forma do molde. Novas aplicações de temperatura e pressão reiniciam o processo, são solúveis e possuem cadeia linear ou ramificada. Como exemplo, pode-se citar o polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(cloreto de vinila) (PVC), entre outros. Neste trabalho, devido ao processo de fabricação envolvido, e ao objeto do estudo em si, será dada ênfase nas propriedades e características dos materiais termoplásticos.

2.2.2 Morfologia cristalina dos polímeros

A estrutura no estado sólido em polímeros consiste no modo como as cadeias moleculares estão empacotadas, de maneira a formar a massa sólida [4]. Este pode ser desordenado, formando a fase amorfa (sem forma), ou ordenado, regular e repetitivo, definindo a fase cristalina. Assim, a cristalinidade em polímeros nada mais é do que o alinhamento de segmentos de cadeias em um arranjo tridimensionalmente perfeito [3].

Há ainda na literatura, polímeros chamados semicristalinos, que são uma mistura das fases cristalina e amorfa, e foram desenvolvidos para realçar propriedades físicas e químicas requeridas [2, 6-8]. Exemplos desses tipos de polímeros são o polióximetileno ou poliacetal (POM), o polipropileno (PP), entre outros. Resinas com estrutura cristalina deveriam ser referidas como semicristalinas porque elas também contêm regiões amorfas, os termos cristalino e semicristalino são ambos usados para descrever diferenças relativas na cristalinidade [6]. Essa mesma referência explica que uma resina denominada semicristalina deveria conter menos estrutura cristalina que uma resina cristalina.

Na verdade, a quantidade de cristalinidade (também conhecido como grau de cristalinidade), ou seja, o número total de átomos envolvidos em uma estrutura cristalina em oposição ao número de regiões amorfas pode variar largamente. Em alguns polímeros nenhuma cristalinidade é formada. Em outros, se todas as condições forem favoráveis, a cristalinidade pode se aproximar dos 100%, mas é mais provável que esteja entre 60 e 70% [4].

Devido às longas cadeias poliméricas, peculiares à natureza dos polímeros, o processo de cristalização destes difere dos sólidos cristalinos convencionais. Os domínios cristalinos, chamados “cristalitos”, são muito menores do que os cristais normais e, contêm muito mais imperfeições e estão interconectados com as regiões amorfas, não havendo uma divisão clara entre as duas regiões [3]. Um exemplo de região cristalina pode ser observado no detalhe (a) da Figura 1. O detalhe (b) da mesma figura ilustra uma região amorfa.

O grau de cristalinidade e a morfologia das regiões cristalinas têm influência direta na maioria das propriedades físicas, mecânicas e termodinâmicas dos polímeros semicristalinos. Quanto maior a cristalinidade, mais elevadas são as propriedades de resistência à tração, densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, resistência à abrasão, temperatura de fusão (T_M), temperatura de utilização [9]. E possuem efeito contrário em propriedades de resistência ao impacto, resistência à elongação e na ruptura, claridade ótica, entre outras [3, 4, 10]. Essas definições são de grande importância para as conclusões finais desse trabalho, como será apresentado nos capítulos finais (Capítulos 4 e 5).

Na década de 50, pela primeira vez, foram obtidos monocristais poliméricos, crescidos a partir do resfriamento de soluções diluídas [3]. Esses cristais podem ser vistos por microscopia eletrônica como placas finas, chamadas “lamelas”, de espessura entre 100 e 200 Å e alguns micra de largura, para um melhor entendimento, o detalhe (a) da Figura 1 ilustra essa afirmação [3, 11].

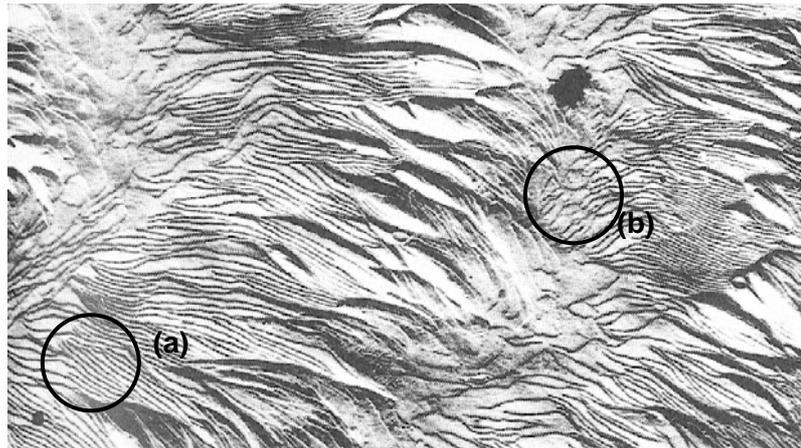


Figura 1 - Micrografia eletrônica de uma amostra de polietileno linear [11]

A morfologia dos polímeros cristalizados a partir do estado fundido é caracterizada pela existência de esferulitos (agregados cristalinos maiores). Quando um polímero cristalizável fundido é resfriado, a cristalização se inicia em núcleos individuais e se desenvolve radialmente, formando os esferulitos. Estas estruturas possuem diferentes tamanhos e graus de perfeição, sendo tão importantes quanto às estruturas de grãos em materiais policristalinos, pois sua morfologia interfere diretamente nas propriedades do material [2, 3, 12].

A observação dos esferulitos é possível através de luz polarizada e aumento de dezenas de vezes com microscópio ótico. Através de filmes polaróides observa-se a Cruz de Malta (Figura 2) característica dos esferulitos, resultante da natureza birefringente do filme polimérico [2, 3, 12, 13].

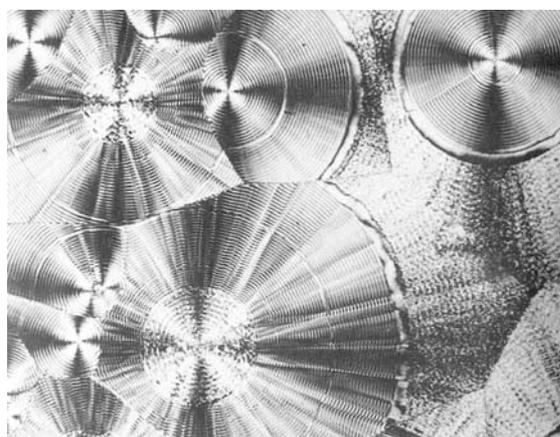


Figura 2 – Cruz de Malta observada por micrografia ótica [11]

2.2.3 Fatores que alteram a cristalinidade

A cristalinidade de uma dada massa polimérica é influenciada principalmente por três tipos de fatores: estruturais, presença de uma segunda molécula (ou fase) e das condições de processamento. Em todos os casos, quando a influência é no sentido de aumentar a ordem ou a regularidade espacial da molécula e facilitar o empacotamento, tem-se um favorecimento para a formação de cristalitos e conseqüentemente a cristalinidade [3].

Dentre os fatores estruturais (estrutura química molecular) estão a linearidade da cadeia, a taticidade, os grupos laterais, as configurações em torno das duplas ligações, a polaridade, a rigidez/flexibilidade da cadeia principal e a copolimerização [3]. Os fatores externos dizem respeito ao contato das cadeias poliméricas com outra molécula diferente, seja uma impureza, aditivo ou outra cadeia polimérica de uma segunda fase, ou ainda a superfície de outro cristal. Todos os fatores citados anteriormente são melhor abordados nas referências [2-4, 12], porém não serão explicitados neste trabalho. Aqui, serão abordados os fatores relacionados às condições de processamento, já que, um melhor entendimento destes será relevante na fase experimental deste estudo.

2.2.4 Efeitos das condições de processamento na cristalinidade

Algumas características morfológicas do produto moldado, tais como orientação molecular, estrutura cristalina, grau de cristalinidade e tensões residuais, estão diretamente relacionadas à história termomecânica determinada pelas variáveis do processo ao qual o material é submetido [14].

No processo de moldagem por injeção, efeitos combinados de pressão, deformação e gradientes de temperaturas, estabelecem um complexo ambiente termomecânico durante a solidificação da peça moldada. Como conseqüência disso, os termoplásticos semicristalinos apresentam algumas morfologias típicas e um padrão de orientação ao longo da espessura do

moldado, que se reflete também, num perfil de graus de cristalinidade, de acordo com a distância da camada à superfície do molde [14].

Para as referências [2, 6, 14, 15], os parâmetros do processo que mais afetam a cristalinidade são relatados nos próximos subitens.

2.2.4.1 Velocidade de injeção

Altas taxas de preenchimento tendem a causar maior orientação (e conseqüentemente maior cristalinidade) na superfície do moldado e menor orientação no núcleo [2, 6]. Logo, baixas taxas de preenchimento causam o efeito contrário, ou seja, maior orientação no núcleo e menor na superfície, devido ao resfriamento lento do polímero enquanto ocorre o preenchimento da cavidade. Neste caso, não se observa uma região altamente orientada, mas sim, um gradiente de orientação ao longo da espessura da peça [6].

Nesse trabalho, a velocidade de injeção adotada foi experimentalmente determinada, ao contrário dos outros parâmetros que foram computacionalmente simulados e foi mantida constante para as configurações com machos metálicos (aço AISI P20, Alumínio e Zamak) e reduzida para as configurações do macho de Resina, como pode ser visto no item 3.6.2 do próximo capítulo.

2.2.4.2 Taxa de resfriamento

No processo de injeção, a taxa de resfriamento varia consideravelmente com as condições de injeção e geometria da peça. Esta variação no resfriamento pode ser causada por alguma área da peça mais espessa que as demais, por diferença de temperatura do molde devido ao projeto mal dimensionado da refrigeração ou por aquecimento por atrito localizado. No estágio amolecido, todos os plásticos são amorfos [6]. À medida que são resfriados, eles gradualmente voltam à sua estrutura cristalina original. No entanto, a cristalização requer tempo para que os cristais cresçam. Se a refrigeração for muito eficiente, o calor será

removido tão rápido que a resina não terá tempo suficiente para cristalizar, e o material, embora sendo cristalino, permanecerá no estado amorfo após ser resfriado. Se o resfriamento for lento, o número de moléculas que tem tempo de se organizar em cristalitos será grande, conseqüentemente, a cristalinidade resultante será alta e a contração também.

Quando preenchendo a cavidade, a resina mais próxima às paredes do molde é resfriada rapidamente e forma uma camada amorfa (Figura 3). Esta camada não é orientada já que o plástico pára de fluir imediatamente depois de resfriar rapidamente. Um pouco mais próximo ao centro (entre as paredes), o plástico apresenta-se fortemente orientado por causa do fluxo rápido durante o preenchimento. No entanto, esta camada exterior resfriará rapidamente formando assim, pequenos cristais. Mais em direção ao centro, o plástico também flui rapidamente, apresentando uma taxa de resfriamento menor.

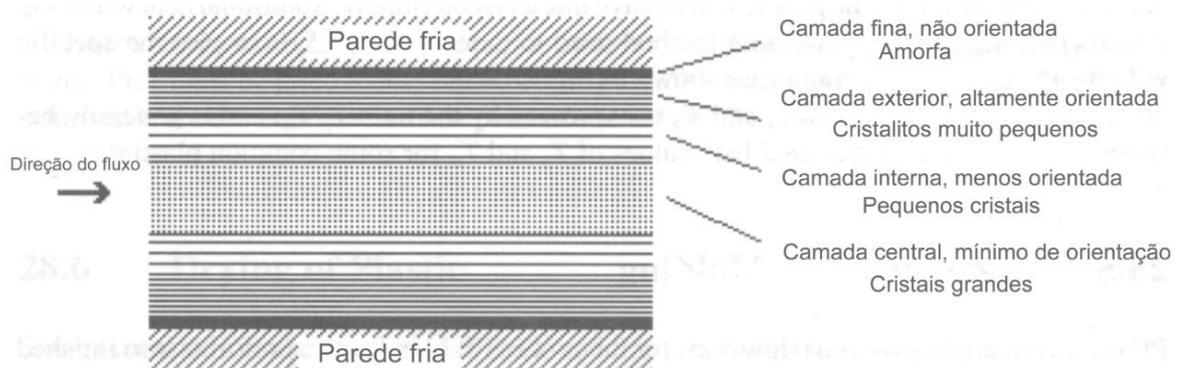


Figura 3 - Variações na cristalização da espessura de parede de um produto em um molde refrigerado [6]

2.2.4.3 Pressão de recalque

O fluxo do polímero durante a fase de recalque¹ é muito instável, já que a cavidade está preenchida e o material (que está se solidificando) se encontra sob pressão hidrostática. O

¹ Pressão aplicada durante a solidificação de uma peça que está sendo injetada. Dessa maneira, a contração volumétrica da peça injetada (similar ao "rechupe" observado na solidificação dos metais) é compensada durante o resfriamento, obtendo-se uma peça com formato perfeito e com estrutura compactada.

fluxo no interior do molde nessa fase ocorre quando for necessário suprir o espaço que seria deixado pelo material em encolhimento (contração). Mas esse fluxo tem um perfil completamente diferente do convencional, porque o polímero no interior da cavidade está sob diferentes gradientes de temperatura, e o fluxo irá ocorrer onde a viscosidade está mais baixa, ou sob temperaturas maiores. Essa consideração é muito importante, pois alerta sobre o fato de que o material mais frio vai encolher antes, dando espaço para mais polímero fluir nesses “afluentes” mais quentes [2].

Aumentando-se a pressão de recalque, geralmente aumenta-se a orientação, isso se a quantidade de material adicional e o tempo de recalque forem suficientes para compensar a contração do polímero durante seu resfriamento. A contração dimensional, assim como outras características que serão abordadas nesse trabalho têm forte ligação com a pressão de recalque [2, 6, 15].

2.2.4.4 Temperatura da massa plástica fundida

A alta temperatura do polímero durante a injeção, em geral, diminui as forças de cisalhamento e de fluxo elongacional devido à menor viscosidade. Além disso, com o polímero a uma temperatura mais alta, o resfriamento ocorrerá num tempo maior, havendo maior tempo para a formação dos cristais [2, 6, 14, 15].

Como serão visto nos próximos capítulos (Capítulo 3 e 4), os resultados obtidos nesse trabalho serão abordados de forma comparativa, e como a temperatura da massa plástica fundida pode influenciar muito nas características finais da peça moldada, preferiu-se manter os valores de toda a zona de aquecimento da rosca de injeção constantes para todas as configurações estudadas.

2.2.5 Efeitos da cristalinidade nas propriedades do produto final

Como visto no item 2.2.3 o grau de cristalinidade determina muitas propriedades

mecânicas na peça final. Também as propriedades óticas dos polímeros são influenciadas pela extensão da cristalinidade. As áreas cristalinas mais densas têm um índice de refração mais alto que as áreas amorfas, por isso os polímeros cristalinos podem ser tanto opacos quanto translúcidos, e polímeros amorfos podem, no entanto, ser transparentes, por exemplo, acrílico e policarbonato [16].

Com o aumento no grau de cristalinidade, observa-se um aumento na resistência à tração, pois a força necessária para quebrar a forte ligação em uma estrutura cristalina compacta é maior que a de um material amorfo. Ainda, a tensão de escoamento aumenta com o aumento da cristalinidade e com o aumento da espessura das lamelas cristalinas [14].

O grau de cristalinidade também tem relação linear com o módulo de elasticidade (ou módulo de Young) sob tração, já que na ausência de orientação, o módulo de elasticidade aumenta significativamente com o grau de cristalinidade [4, 14]. O diâmetro dos esferulitos também interfere nas propriedades mecânicas. Quanto maior a quantidade de esferulitos pequenos, maior a tenacidade à fratura, pois esferulitos menores apresentam maior região de deformação plástica e maior densidade de microfibrilas antes da trinca inicial. Já em uma estrutura de esferulitos maiores, a formação das microfibrilas é localizada na fraca região interesferulítica, resultando em baixa resistência ao impacto [4].

As informações listadas nesse item são de extrema importância nesse trabalho, pois, juntamente com as observações das micrografias realizadas (item 4.3), uma melhor análise do comportamento mecânico das amostras poderá ser realizada.

2.3 Processos de transformação de materiais poliméricos

Os processos de transformação de um produto de plástico podem ser: moldagem por compressão, transferência, composição (plásticos reforçados), injeção, extrusão, sopro e termoformação [4]. O objetivo desse trabalho envolve o estudo de um produto que será transformado pelo processo de injeção, por isso somente esse processo será aqui abordado.

O processo de moldagem por injeção, atualmente é um dos mais estudados e conhecidos para o processamento de polímeros. Esse processo caracteriza-se por uma termoformação prévia de plásticos, que nos termoplásticos se dá através de um amolecimento e plastificação do material (granulado), por admissão de energia, injeção em um molde e, após, retirada de calor [8, 17]. Em outras palavras, é necessário aquecer o material a ser injetado a um estado de fluidez, conformá-lo na cavidade, para então resfriá-lo enquanto ainda estiver contido na cavidade do molde.

Uma peça injetada de qualidade só pode ser obtida com a combinação correta de máquina injetora, molde e material, que quando inter-relacionados apresentam um grande número de variáveis (ou parâmetros) [17]. Os parâmetros mais importantes e, que serão utilizadas no desenvolvimento desse trabalho, serão descritos, logo a seguir, no item 2.4.2

2.4 Moldes de injeção

Um molde (também chamado de ferramenta, ou ferramental) de injeção é uma montagem complexa, altamente sofisticada, de vários componentes com funcionalidades bem definidas, capazes de dar a forma desejada ao polímero amolecido que é injetado em seu interior, resfriá-lo e extrair o produto moldado [4, 6, 7, 15, 18-20]. Esta complexidade é oriunda do alto grau de interatividade com outras áreas de conhecimento envolvidas, tais como, transferência de calor, mecânica dos fluidos, tribologia, e outras.

A região de um molde onde a compreensão e interação de todas as áreas acima citadas é de extrema importância é a região moldante. É nessa região que se encontra a área impressa² com o formato externo (cavidade fêmea³) e formato interno (inserto macho⁴) do produto, além

² Também denominado *impressão* que é o espaço vazio dentro do molde de injeção onde o polímero fundido irá preencher formando a peça.

³ Também pode ser denominado simplesmente de fêmea.

⁴ Também pode ser denominado simplesmente de macho, ou de *bucha*.

do canal (ou canais) de alimentação⁵ e de refrigeração.

A Figura 4 representa de forma genérica e simplificada os componentes que fazem parte de um molde de injeção, e subdivide o mesmo em seis partes, cujas diferentes funções serão explicitadas a seguir.

- Os componentes responsáveis pelo guiamento e alinhamento do molde são fundamentais para sua concentricidade e conseqüente qualidade do produto final.
- A alimentação do molde, ou seja, canais de injeção principais e secundários são os responsáveis pelo preenchimento de todas as cavidades, e, portanto, de grande influência no tempo total de ciclo de injeção.
- O sistema de ejeção, ou extração, responde pela perfeita extração do produto final, e, na maioria dos casos, deve garantir que o mesmo seja extraído mecanicamente de dentro do molde.
- O sistema de troca de calor, ou de refrigeração, também conhecido como refrigeração do molde, deve manter estável a temperatura deste, e, além disso, ser eficiente o suficiente para que o produto esteja solidificado no momento da extração.
- É através das placas bases, superior e inferior, que o molde será preso na máquina injetora (sistema de montagem), e as forças de injeção e extração, transmitidas para o funcionamento cíclico do processo.
- E, como visto anteriormente, a principal região de um molde, a região moldante que é considerada uma região crítica uma vez que seus componentes interagem diretamente com o material polimérico e com o fluido utilizado na refrigeração do molde. Por esta razão estas partes demandam particular atenção na seleção

⁵ Região pela qual o polímero chega até as cavidades e impressão.

do material.

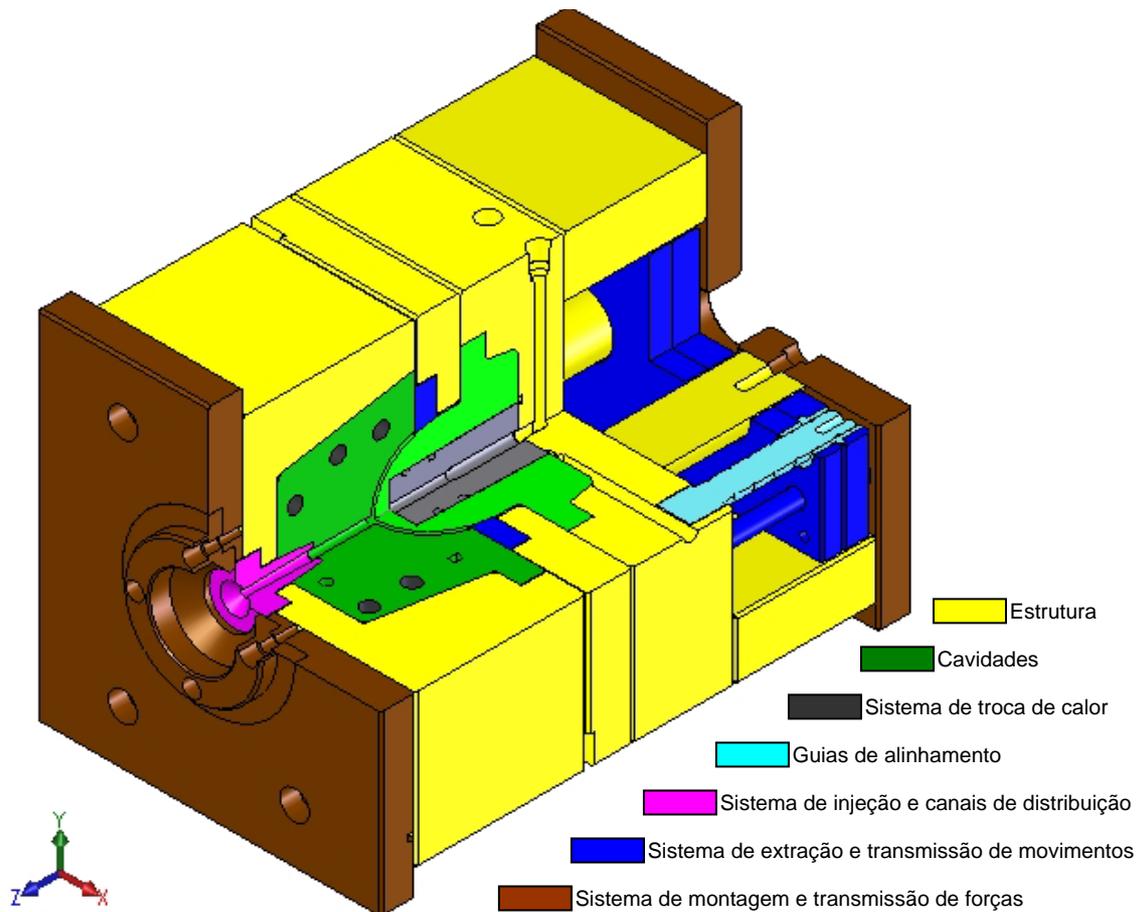


Figura 4– Representação genérica de um molde de injeção (em corte)

2.4.1 Materiais envolvidos no projeto de um molde

Os materiais que envolvem a fabricação de um molde de injeção são elementos chave em todos os sistemas envolvidos (alimentação, extração, refrigeração, estrutura, cavidades). Como regra geral, as partes do molde em contato com o material plástico fundido e os elementos móveis que suportam atrito devem ser tratadas termicamente. Outras partes, que compõem a estrutura do molde são de aço com baixo teor de carbono. Compreender as propriedades, características e aplicabilidade dos materiais envolvidos é fundamental para a competitividade das empresas fabricantes de moldes, as matrizarias [15].

Os moldes de injeção modernos são construídos com, vários tipos de materiais, desde aços de alta liga, que são usados em moldes para séries mais longas (500 mil ciclos) e

exigentes, até os aços ao carbono para peças menos críticas e séries mais curtas. Além disso, para séries protótipos, ou séries muito curtas são utilizadas ligas de alumínio ou zinco [19], ou mais recentemente, materiais não metálicos nas zonas moldantes, dando origem ao que se designa por moldes híbridos, ou seja, com materiais metálicos e não metálicos. Esses últimos, possibilitando uma produção de até 2000 ciclos [1].

Mais recentemente ainda, também começam a ser utilizados moldes em que as cavidades são obtidas, quase diretamente, através de técnicas de prototipagem rápida, como por exemplo, por meio de sinterização de partículas metálicas [20].

É cada vez mais comum o uso de materiais não metálicos, resinas epoxídicas, por exemplo, nas regiões moldantes de um molde. Nos itens 2.5 e 2.6 desse trabalho, o uso de prototipagem rápida e de materiais não metálicos na fabricação de moldes de injeção, é abordado novamente.

2.4.1.1 Aspectos importantes na escolha do material das cavidades

Entre as principais propriedades a serem consideradas na escolha dos materiais utilizados em cavidades de moldes de injeção, estão [19, 21]:

- Fabricação econômica (usinabilidade, tanto por processos com geração de cavacos como por eletro-erosão, polibilidade);
- Capacidade de ser tratado termicamente sem problemas;
- Rigidez e resistência suficientes;
- Alta condutividade térmica;
- Resistência à corrosão;
- Estabilidade dimensional.

No artigo “Seleção de aços para cavidades/machos de moldes de injeção” [22], é mostrado como que cada uma dessas propriedades afeta na seleção do material para as cavidades moldantes. Como esse trabalho não tem como objetivo selecionar, ou definir qual o

melhor material a ser usado em um molde, fica essa referência como uma orientação para esse assunto.

Além de todas estas propriedades citadas anteriormente, outros fatores ou características devem ser levados em consideração no momento da escolha dos materiais para a fabricação de um molde. Podem-se citar como exemplo, os custos e o tempo de desenvolvimento de um produto, que acabam tornando-se peças-chave nesta hora. Outro ponto forte na seleção do material, como relatado anteriormente, é o tamanho do lote a ser produzido [20].

É impossível selecionar um único material que alie produtividade no processo, baixo custo, rapidez na manufatura e peças com a qualidade desejada com todas as “características ideais” citadas anteriormente [20]. Por exemplo, o uso de alumínio nas cavidades de injeção diminuirá o tempo de ciclo, pois o alumínio apresenta uma condutividade térmica cerca de três vezes superior a de um aço, por outro lado a vida útil dessa ferramenta será reduzida, pois o módulo de elasticidade desse material é cerca de três vezes menor que o do aço [19]. Além do módulo de elasticidade inferior, o alumínio também apresenta uma dureza menor que o aço, o que ocasionará um elevado desgaste por abrasão.

Um outro exemplo que pode ser citado é o uso de cavidades de injeção feitos de resinas epoxídicas. Esse tipo de material pode ser até eventualmente usado como isolante térmico, uma característica que vai de encontro com a teoria de seleção de materiais para moldes de injeção, já que o material selecionado deve apresentar boa condutividade térmica. Mas, se o lote de peças que devem ser injetadas for muito pequeno, o uso desse tipo de material se justifica, pois além da resina ser mais barata que um material metálico, o processo de manufatura é várias vezes mais rápido, pois elimina grande parte dos processos de usinagem envolvidos [1]. Informações sobre as propriedades de alguns materiais usados em moldes de injeção podem ser encontradas no item 3.6.1 desse trabalho.

Porém, é necessário avaliar quais características mecânicas, dimensionais e químicas o produto moldado precisa apresentar, e quais dessas propriedades são afetadas por cada material que geralmente utiliza-se nas cavidades moldantes. Ao longo desse trabalho essas questões novamente serão abordadas, analisadas e concluídas.

2.4.2 Variáveis importantes na injeção de polímeros

Para que haja uma melhor compreensão dos conceitos envolvidos no processo de moldagem por injeção, assim como uma melhor compreensão e entendimento do experimento desenvolvido nesse trabalho e suas análises, convém que estes conceitos sejam definidos nesse momento de uma forma explícita. Essas variáveis mais comumente empregadas e que serão estudadas nesse trabalho são [4, 6, 15, 17]:

- *Temperatura do canhão*: também conhecida como temperatura de moldagem, ou temperatura de injeção (T_1). Representa a temperatura, dada em graus Celcius [$^{\circ}C$], na qual o material a ser injetado deve estar quando do início do processo de injeção.
- *Pressão de injeção* (P_1): é a pressão que a máquina de injeção exerce sobre o material durante o processo de injeção, e é dada em *bar*, kgf/cm^2 , ou *MPa*.
- *Pressão de recalque* (P_R): ou pressão de manutenção, é a pressão aplicada à moldagem após o final do preenchimento, com o objetivo de compensar a contração que o material polimérico sofre durante o seu resfriamento. Também é dada em *bar*, kgf/cm^2 , ou *MPa*.
- *Tempo de recalque*: corresponde ao período durante o qual o fuso exerce a pressão de recalque, é dado em segundos [*s*].
- *Temperatura do molde* (T_M): é a temperatura, dada em graus Celcius [$^{\circ}C$], na qual as paredes das cavidades devem estar no instante da injeção.

- *Tempo de resfriamento*: o resfriamento inicia-se após o contato do polímero com as paredes das cavidades, no entanto, considera-se o tempo de resfriamento como sendo o período após a fase de pressurização. O tempo de resfriamento deve ser o tempo necessário que permita a adequada extração da peça do molde.
- *Velocidade de injeção* (v_i): é a velocidade com que a máquina de injeção introduz o material no molde. A velocidade de injeção é diretamente relacionada com o tempo de injeção (t_i), que é o intervalo de tempo entre o instante em que o cilindro avança e o momento em que a pressão de injeção pára de atuar. As unidades usadas para velocidade de injeção e para o tempo de injeção, são, respectivamente, *cm/s* e *s*.
- *Força de fechamento* (E_f): é a força que deve resistir a pressão de injeção para manter o molde fechado. É dada em *kN* e controla a máxima área de moldagem projetada que pode ser produzida.

Como visto no item 2.2.4, o comportamento do polímero durante o escoamento gera uma série de fenômenos que podem afetar o desempenho das peças produzidas. Tensões resultantes do processo de injeção são de fundamental importância para a avaliação da qualidade do produto final. Além disso, a geometria da peça também pode ocasionar problemas [17]. A seguir, uma listagem dos efeitos mais importantes a serem considerados no processo de moldagem por injeção, e que afetam diretamente as propriedades mecânicas dos produtos são apresentadas [8, 17]:

- Linhas de solda, ou “*weld line*”;
- Linhas de junta, ou “*meld line*”;
- Efeito de hesitação;
- Efeito de empacotamento, ou “*overpack*”;

- Efeito de refluxo, ou “*underflow*”;
- Rechupe.

Nesse trabalho, o efeito mais importante a ser analisado, devido à geometria da peça proposta, é o efeito causado pelas linhas de solda. Essas linhas são formadas quando duas frentes de fluxo se encontram. Além da aparência visual, as linhas de solda causam enfraquecimento mecânico da peça, pois elas agem como concentradoras de tensão, causam também descontinuidade da estrutura macromolecular, além de refletirem no acabamento visual do produto. A influência das linhas de solda pode ser melhor entendida com os resultados apresentados no item 4.5.2 (Análise de resistência ao impacto) e 4.7 (Aspectos visuais).

2.4.3 Simulação numérica de processos de injeção

O advento e a evolução de ferramentas computacionais, no auxílio ao projeto de peças e moldes para termoplásticos, possibilitaram um considerável avanço no processo de moldagem por injeção. Juntamente com os sistemas CAD, os sistemas CAE (Engenharia Auxiliada por Computador) permitem a identificação de alguns parâmetros, tais como: a combinação ideal entre a geometria de uma peça e o material em que será produzida, o projeto do molde, além de condições de processamento ideais [23].

Na prática, o uso de sistemas CAE é vantajoso no projeto de moldes para peças de geometria complexa ou de especificações rigorosas, quando tolerâncias dimensionais mais apuradas são exigidas, ou também, quando se deseja ciclos de injeção mais curtos, ou otimizados. A capacidade de identificar potenciais problemas e corrigi-los na fase de projeto minimiza os custos e os riscos financeiros, devido à diminuição do número de amostras e do tempo de ensaio do molde, antes do mesmo entrar em produção [24].

Obter soluções analíticas para as equações diferenciais que regem o comportamento de um fluido, no caso a massa polimérica fundida, é uma tarefa difícil. Dessa forma são

utilizados métodos de aproximação para a definição da geometria da peça e condições de contorno. O método de elementos finitos é o mais indicado para resolução desse tipo de problema [25, 26]. Soluções analíticas para problemas de dinâmica de fluido computacional são encontradas apenas para situações ideais, como pode ser visto em referências de mecânica de fluidos [27, 28].

O Mold Flow, ferramenta computacional de simulação de fluxo que foi utilizado nesse trabalho, utiliza o método dos elementos finitos (FEM) para solução numérica das equações que descrevem o fluxo do polímero fundido [29]. Entre algumas análises obtidas desse tipo de simulação no Mold Flow podemos listar: tempo de preenchimento, pressão de injeção, ocorrência de linhas de solda, temperatura e tempo de congelamento do canal, empenamento, contração, eficiência do sistema de refrigeração, entre outras.

O uso de ferramentas computacionais foi vital para a elaboração desse trabalho, desde o projeto do molde, que foi assistido por um sistema CAD, assim como na sua manufatura que foi programada por meio de software de CAM (Manufatura Auxiliada por Computador). E, principalmente, o uso de sistema CAE, devido à dificuldade de simulação das melhores condições de processo para o produto, já que materiais alternativos foram usados no experimento. No Capítulo 3, onde o procedimento experimental desse trabalho é relatado, pode-se observar o quanto foi vantajosa à aplicação desses recursos.

2.5 Prototipagem rápida e ferramental rápido

As tecnologias de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* - RP) foram desenvolvidas tendo em vista a busca pela redução do tempo de desenvolvimento de protótipos de produto. Apesar de recente, essas tecnologias estão sendo implantadas como ferramenta essencial no ciclo de desenvolvimento de novos produtos, pelas séries de vantagens que apresentam [30].

A prototipagem rápida consiste na utilização de um conjunto de processos tecnológicos e de tecnologias da informação que permitem fabricar modelos físicos tridimensionais

diretamente a partir de um desenho em CAD. Os modelos são construídos progressivamente por camadas, não havendo necessidade de utilização de outros tipos de ferramentas. Através das técnicas de RP peças de geometria complexa podem ser obtidas com a mesma simplicidade com que se obtêm modelos de geometria simples (facilmente obtidos pelas tecnologias convencionais de corte). Além disso, o uso de RP torna possível a fabricação de geometrias impossíveis de serem obtidas diretamente pelos processos de fabricação convencionais, gerando grandes economias de custo e de tempo [31].

As técnicas mais conhecidas e usuais para obtenção de Prototipagem Rápida são listadas a seguir [30-37]:

- Estereolitografia - *Stereolithography* (SL);
- Modelagem por Fusão e Deposição de Material - *Fused Deposition Modeling* (FDM);
- Manufatura de Objetos em Lâminas - *Laminated Object Manufacturing* (LOM);
- Sinterização Seletiva a Laser - *Selective Laser Sintering* (SLS);
- Impressora 3D (3DP ou TDP).

No caso de peças poliméricas injetadas, uma maneira de se obter uma quantidade necessária de protótipos, no mesmo material requerido no projeto, é recorrer ao uso de um molde protótipo. Este tipo de ferramenta se caracteriza pela construção de cavidades (macho e fêmea) feitas em material de baixo custo e a utilização de um porta-molde padrão [32, 38, 39].

Algumas técnicas de Prototipagem Rápida podem ser dedicadas a obtenção de ferramentas de produção, como por exemplo, moldes de injeção e, nesse caso são denominadas de Ferramental Rápido. (*Rapid Tooling* - RT) [40].

Essas técnicas de Ferramental Rápido podem ser classificadas pela sua via de obtenção, podendo essa ser direta ou indireta. Entende-se por obtenção direta a técnica onde a

cavidade é diretamente produzida por Prototipagem Rápida, e obtenção indireta a técnica que produz a cavidade através de um modelo da peça a ser produzida, que pode ser obtido por Prototipagem Rápida, ou não. Quando produzidas por técnicas de obtenção direta, a cavidade possui na superfície moldante o material usado na técnica de Prototipagem Rápida [23]. Nesses casos, é necessário um estudo prévio para ver se não há compatibilidade química entre esse polímero e o polímero que será injetado. Outro ponto a ser comentado sobre essa técnica é que o enchimento da parte posterior da cavidade pode ser feito com resina, por exemplo, resina epoxídica com alta carga de material condutor de calor, para facilitar a troca térmica no ciclo de injeção [41].

Essas técnicas também podem ser classificadas por diferentes critérios, como por exemplo, a vida da ferramenta e o material. Na Tabela 1, a seguir, essas técnicas são listadas pelo ponto de vista de obtenção do ferramental [23, 32, 39-41].

Tabela 1 - Técnicas de obtenção de Ferramental Rápido classificados pela via de obtenção[41]

<i>Processos Diretos</i>	<i>Processos Indiretos</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Sinterização Seletiva a Laser - SLS • SLSm – Sinterização por Laser de Metais • DMLS – <i>Direct Metal Laser Sintering</i> • Direct AIM (<i>ACES Injection Moulding</i>), sendo <i>ACES – Accurate Clear Epoxy Solid</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D Keltool® • Moldes de Silicone • Fundição por modelo perdido • Moldes de resina carregada – EP • <i>Metal Arc Spraying</i>

As técnicas convencionais para a manufatura de moldes para a injeção de polímeros, usualmente geram significativo aumento no tempo de desenvolvimento de um produto e do investimento empregado [19, 39, 42]. O uso de técnicas de RT tem sido aplicado pelas indústrias para a fabricação mais rápida de pequenos lotes de peças, com propriedades similares as peças obtidas em grandes lotes.

Há muita divergência na literatura sobre o conceito de Ferramental Rápido. Por exemplo, alguns autores comentam que Ferramental Rápido é uma técnica de Prototipagem Rápida aplicada na fabricação de moldes de injeção [19, 39, 42, 43]. Para Menges [19], no conceito de Ferramental Rápido, os processos convencionais de usinagem também podem ser

aplicados. Rosochowski [44] vai além na definição de Ferramental Rápido e Prototipagem Rápida para moldes de injeção. Enquanto Prototipagem Rápida é baseado na adição de material na obtenção das cavidades, Ferramental Rápido é baseado na remoção de material por usinagem. Deste modo, HSC (*High Speed Cutting*) também deveria ser entendido como um processo de Ferramental Rápido [45, 46]. Já, Rosato [18] defende que um molde protótipo é usualmente um molde com uma simples cavidade, usando metais leves, resinas epoxídicas ou borrachas de silicone na construção de suas cavidades.

Nesse trabalho, uma das cavidades utilizadas no experimento foi manufaturada através do processo indireto de Ferramental Rápido, denominado Molde de Resina Carregada (EP). Conforme ilustrado nas etapas da Figura 5, um modelo do produto que geralmente é obtido por técnica de prototipagem rápida, é montado sobre uma base rígida (*etapa a*) respeitando a linha de fechamento e a geometria externa da cavidade. Após a resina (*etapas b e c*), que nesse momento deve estar desgaseificada (sem a presença de bolhas), é vazada sobre a placa e o modelo do produto (*etapa d*). Após essa etapa é realizada uma nova desgaseificação da resina em câmara de vácuo (*etapa e*) [47].

Depois de endurecido, o mesmo processo é realizado para a outra cavidade do molde (*etapa f*). O modelo é retirado das cavidades, que juntas (*etapa g*) passam pelo processo de cura da resina em forno com temperatura controlada (*etapa h*), para após essa etapa, serem montadas no molde de injeção [40]. Algumas dessas etapas, que foram realizadas no experimento desse trabalho, podem ser visualizadas na Figura 9 do item 3.3.

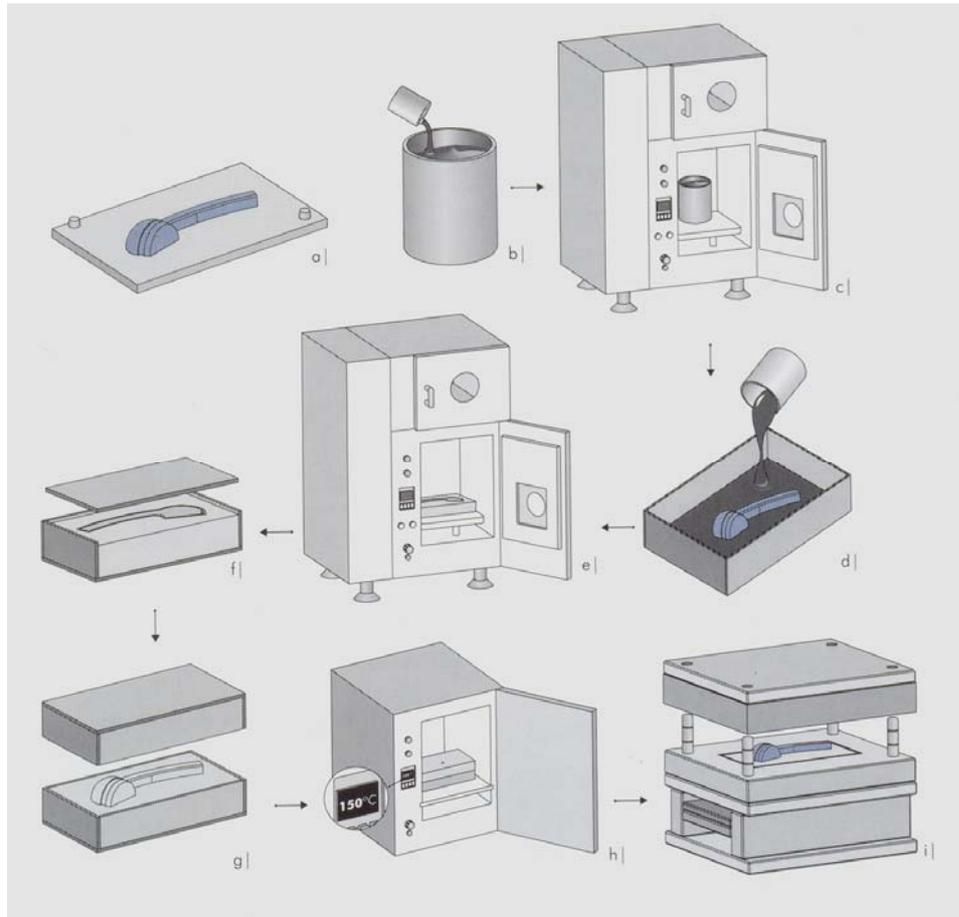


Figura 5- Processo de obtenção de cavidades em resina epoxídica [40]

O uso dessa técnica permite a inserção de canais conformáveis em cobre para o sistema de refrigeração do molde, permitindo assim uma maior eficiência desse sistema. Devido à baixa condutividade térmica das resinas epoxídicas, o ciclo de injeção para esses moldes é mais longo, podendo ficar entre 3 e 5 minutos, caso não se use nenhum tipo de refrigeração. O parâmetro de processo que deve ser muito bem observado durante a injeção é a temperatura do molde, que não deve superar a temperatura de transição vítrea da resina, por esse motivo o estudo térmico nas cavidades é de primordial importância [48-51].

2.6 Moldes de injeção híbridos

É considerado um molde híbrido de injeção o molde que faz uso de técnicas e materiais diferentes não convencionalmente usados na construção de seus blocos moldantes (macho e fêmea) [43]. Observa-se então, a similaridade de alguns conceitos sobre Ferramental

Rápido e Molde Híbrido, mas ambos possuem os mesmos objetivos: redução nos custos e tempos de produção do molde de injeção, além da obtenção de protótipos semelhantes às peças finais (*true prototype*) [52]. O conceito de moldes híbridos, segundo alguns autores, também está relacionado ao conceito de Molde Protótipo. Conseqüentemente, neste trabalho, os conceitos de Moldes Híbridos, Ferramental Rápido e Molde-Protótipo serão aplicados de forma não diferenciada.

2.6.1 Materiais usados no conceito de Moldes Híbridos

Tem-se observado atualmente um aumento na literatura, das técnicas de Ferramental Rápido obtido por meio direto ou indireto. Isso é justificável pela facilidade e tempos reduzidos na preparação da ferramenta, além do baixo custo de investimento empregado que algumas dessas técnicas apresentam.

Nessas técnicas, que utilizam resinas poliméricas como materiais de base, vários materiais poliméricos podem ser injetados, dependendo da sua afinidade química com material da cavidade ou do inserto. Fica inviável nesse momento relacionar todos esses materiais, mas podem-se listar os mais comumente usados, como por exemplo, resinas epoxídicas, acrílicas ou de poliéster, ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), ou de poliamida (PA) com ou sem carga metálica, como no caso da técnica FDM [41, 53].

As resinas usadas na obtenção das cavidades dos Moldes Híbridos, usualmente são compostas por cargas metálicas, geralmente pó ou limalha de alumínio, que melhoram as propriedades mecânicas e térmicas do molde [40].

Quanto aos materiais metálicos usados nas cavidades dos Moldes Híbridos, a gama de materiais que podem ser aplicados nesse conceito se torna muito grande. Nesse tipo de molde é comum o uso de ligas baseadas em alumínio, em cobre e em zinco, assim como ligas de aço carbono, ou outros aços de baixa liga. Mais recentemente, observa-se a utilização de materiais cerâmicos nas cavidades de injeção [46, 54, 55].

A utilização de alguns desses materiais listados inviabilizariam economicamente a fabricação de um molde para séries curtas, como é o proposta de um Molde Híbrido. Para isso deve-se realizar um estudo de viabilidade econômica, baseado em tamanhos dos lotes a serem produzidos, tempo de obtenção do ferramental e, principalmente das características que o produto final deve apresentar.

Para esse trabalho, os seguintes materiais foram selecionados para o estudo proposto: aço AISI P20 [56], Alumínio liga 7075-T6 [57], Zamak-5⁶ [58] e Resina Epoxídica RenCast® 436 [59]. A escolha destes quatro materiais foi propositalmente direcionada para a avaliação destes em relação ao seu desempenho na utilização em Ferramentais Rápidos.

2.6.2 Viabilidade econômica no uso de Moldes Híbridos

Como dito anteriormente no item 2.4.1.1, vários autores consultados, tratam de maneira similar à questão da seleção de materiais para moldes convencionais de injeção. Para eles, muitos fatores determinam a seleção dos materiais para cavidade fêmea e inserto macho. Tais fatores resultam de considerações econômicas, natureza e formato da peça a ser moldada e sua aplicação, e de algumas propriedades específicas, tais como, condutividade térmica, resistência mecânica, ductilidade, dureza e tratamentos térmicos que podem ser empregados.

Além disso, detalhes sobre o produto a ser moldado são de grande importância e devem ser fornecidos previamente ao projeto do molde. Por exemplo, material plástico a ser injetado, contração, se há o acréscimo de cargas de reforço, se o material é corrosivo, etc. Estes detalhes auxiliam na definição das dimensões mínimas da cavidade, na previsão do desgaste sob condições de produção, e na qualidade requerida pelo produto em relação às dimensões e aparência superficial [4, 8, 10, 15].

⁶ ZAMAK, Liga baseada em zinco com grandes percentuais de alumínio, magnésio e cobre.

O conhecimento prévio da demanda de produção ou colocação no mercado do produto auxilia na determinação da quantidade de peças a serem produzidas no molde, ou seja, o número de impressões que ele terá, e conseqüentemente, sua vida útil estimada.

Através disso, é possível saber se o investimento em um molde convencional é justificável e em quanto tempo o retorno por este investimento estará completo. Somado a isso, com a tendência cada vez maior de moldes de injeção de fabricação rápida, o processo de seleção de materiais passa a ser um aspecto cada vez mais importante [1]. Na Tabela 2, como exemplo, cita-se o valor e o prazo de entrega para um molde de injeção de duas cavidades, quatro pinos extratores e duas gavetas, que foram orçados em vários pólos mundiais especializados em moldes de injeção. A última linha dessa tabela mostra o valor desse mesmo molde, caso fosse fabricado através de técnicas de Ferramental Rápido *Direct Metal Laser Sintering* [60]. Fica evidente a vantagem econômica desse tipo de técnica, em comparação a técnica convencional.

Tabela 2 - Valor e prazo de entrega de um molde de injeção de duas cavidades, quatro pinos extratores e duas gavetas [60]

Local	Valor [Euro]	Prazo de entrega
Polônia	21000	4 meses
Romênia	19000	3 meses
Portugal	18500	3 meses
Espanha + Coréia	21000	3 semanas
China (top level)	12500	9 semanas
China (low level)	9500	11 semanas
<i>Ferramental Rápido (DMLS)</i>	<i>9000</i>	<i>1 semana</i>

Os materiais mais utilizados nas outras partes do molde não serão comentados neste momento, já que o foco deste estudo diz respeito somente às partes moldantes do molde. Além disso, a bibliografia citada complementa de maneira bastante eficaz esta revisão.

Quanto ao tamanho do lote produzido, moldes de injeção que possuem cavidades em Alumínio e Zamak podem apresentar uma vida útil entre 100 mil e 200 mil peças. Já para

cavidades em aço, o lote mínimo esperado é de 500 mil peças, podendo chegar a 1 milhão [19].

Moldes com cavidades em material epoxídico com carga de alumínio podem apresentar lotes de 50 até 1000 peças, dependendo do polímero e dos parâmetros de injeção adotados, além da geometria da peça a ser injetada [23].

2.7 Considerações finais

Esse capítulo abordou os conceitos que serão utilizados neste trabalho. A utilização do conceito de Moldes Híbridos para injeção de polímeros foi explorada sob o ponto de vista das propriedades (mecânicas, químicas e físicas) finais do protótipo produzido. Além disso, foram expostos os aspectos teóricos básicos sobre o processo de injeção de polímeros, como a seleção do material para as cavidades, parâmetros de injeção, simulações computacionais para a otimização desses parâmetros, além de um estudo sobre a morfologia cristalina de um polímero.

Todos os conceitos relacionados nesse capítulo serão de valiosa importância para o entendimento do trabalho.

3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo, será relatado como o desenvolvimento experimental foi realizado, como o mesmo foi definido e planejado e, quais equipamentos e materiais foram utilizados na obtenção das amostras, e quais análises e suas respectivas técnicas foram adotadas na caracterização dessas.

O conteúdo abordado nesse capítulo está relacionado com o terceiro, quarto e quinto objetivos específicos, citados no Capítulo 1.

3.2 Considerações gerais sobre o experimento

Este trabalho compreende uma pesquisa experimental, na qual serão empregados dois tipos de materiais metálicos (Alumínio 7075-T6 e Zamak-5) e um material polimérico (resina epoxídica RENCast® 436) em uma das partes moldantes (macho) de um molde de injeção. Estes materiais alternativos foram selecionados, a partir de estudos tanto na literatura como na melhores práticas industriais, como os mais utilizados no desenvolvimento de ferramental rápido. Além disso, foi feita uma comparação destes materiais alternativos com um material convencionalmente utilizado (aço AISI P20) nesta região do molde. Esta comparação levou em conta principalmente o tempo de fabricação, a qualidade superficial e o custo de cada peça com material diferente, já que estes são fatores relevantes na aplicação de técnicas de ferramentais rápidos.

Quanto à influência no polímero, foram avaliadas alterações na morfologia, cristalinidade, aspectos visuais e dimensionais e, resistência à tração e impacto. Os resultados desses estudos e comparações estão disponíveis no Capítulo 4 dessa dissertação.

Com o objetivo de nortear a configuração da célula de injeção, principalmente quanto

aos valores de pressões de injeção e recalque, tempos de injeção e recalque e temperatura do polímero, para cada tipo de material utilizado nas cavidades moldantes foram realizadas, anteriormente ao teste no molde, simulações computacionais do processo, com a utilização do software Moldflow (ver item 3.6).

Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizada uma célula de injeção para a moldagem, constituída dos seguintes equipamentos:

- Máquina de injeção *HIMACO H150-80*, com 80 toneladas de força de fechamento;
- Molde de injeção sensoriado e com cavidades intercambiáveis (item 3.3);
- Termoregulador para controlar a temperatura do molde, *MORETTO THP84*, e
- Sistema computadorizado para aquisição de dados de pressão e temperatura, *VISHAY System 5000* (item 3.3.2).

Essa célula de injeção, assim como o molde utilizado podem ser visualizados na Figura 6, a seguir:



Figura 6 - Célula de injeção usada

3.3 Molde de injeção experimental

3.3.1 Concepção e projeto

O molde de injeção utilizado nesse experimento possui a característica de intercambialidade de suas cavidades moldantes, podendo a troca ser feita rapidamente e sem a

necessidade de se retirá-lo da máquina injetora. O projeto do molde, assim como a proposta de geometria para a peça de estudo foi desenvolvida em parceria com a Universidade do Minho, na qual a UCS possui convênio.

O molde possui as seguintes dimensões, 310mm x 180mm x 200mm (h x l x c), e é montado sobre um porta molde marca Polimold série 18.20 de sub série 20, com placa adicional para extração [61].

O molde, juntamente com suas cavidades intercambiáveis, está ilustrado na Figura 7. Na Figura 8, um modelo em CAD3D do projeto do molde pode ser visualizado.

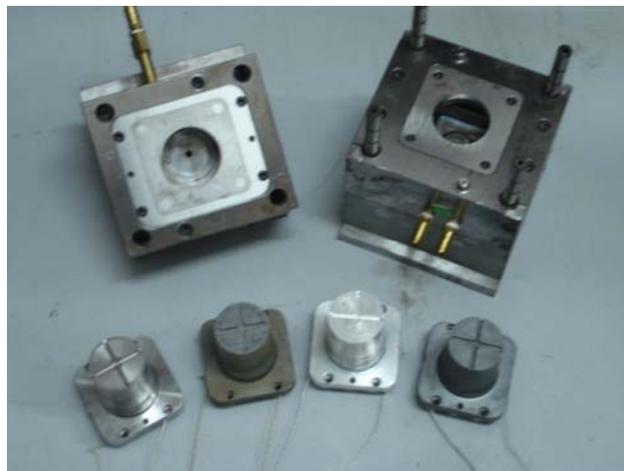


Figura 7 - Molde experimental, juntamente com suas cavidades intercambiáveis. Da esquerda para a direita: macho de aço AISI-P20, Resina RenCast 436, Alumínio 7075-T6, Zamak-5

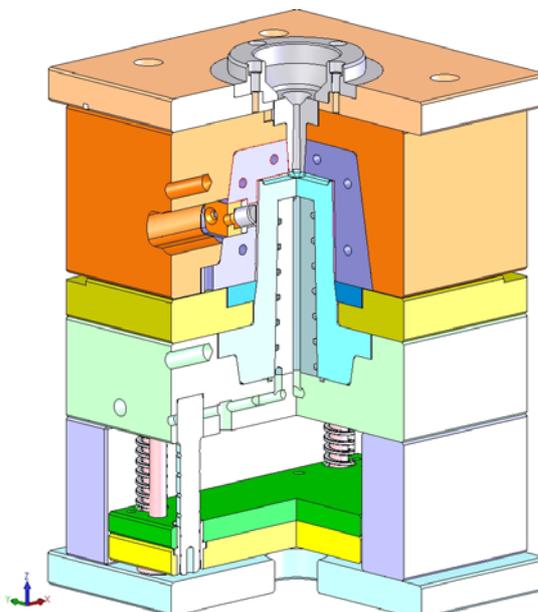


Figura 8 - Molde experimental em corte

A geometria do inserto macho foi desenvolvida em CAD, e após foram usinadas três unidades em máquina de Controle Numérico Computadorizado (CNC) uma para cada um dos diferentes tipos de materiais metálicos usados (AISI P20, Alumínio e Zamak). A programação de usinagem simulada e realizada em software de CAM. O acabamento superficial adotado foi o denominado acabamento funcional, ou seja, o acabamento apresentado pela usinagem, não necessitando assim, outro processo mecânico ou manual. O acabamento funcional deve garantir que a peça seja extraída sem maiores problemas.

Um dos insertos macho apresentados nesse trabalho foi manufaturado através do processo indireto de obtenção de Ferramental Rápido denominado Molde de Resina Carregada, como visto no item 2.5. A resina epoxídica usada nesse inserto foi a da marca RenCast® 436, com carga de 10% em massa de alumínio granulado [49]. Na fundição, os sistemas de refrigeração e de fixação já foram anexados ao inserto, como pode ser visto na Figura 9-b. O projeto do sistema de refrigeração para os insertos macho de materiais metálicos pode ser melhor compreendido analisando as figuras do Anexo X.

Procurou-se usar um sistema de refrigeração no inserto em resina que fosse semelhante (dimensionalmente) ao sistema usado nas outras cavidades [48, 62]. Porém, a serpentina de cobre usada foi deslocada 5mm para baixo, isso para que esse inserto ficasse com uma parede mais espessa na região onde a massa fundida entra em contato com a cavidade e, conseqüentemente mais resistente. Essa semelhança dimensional foi observada e realizada para que não houvesse grandes influências do comportamento térmico do molde sobre a peça moldada, exceto quanto à condutividade térmica dos materiais constituintes. O uso desse sistema de refrigeração garantiu que o ciclo de injeção, para esse tipo de inserto, fosse de 120s, ao invés de 180s ou 300s, como mencionado no capítulo anterior (item 2.5).

A fabricação do inserto macho em resina seguiu os procedimentos recomendados pelo fabricante Huntsman. Um pré-molde de poliuretano (PU) do inserto foi usinado em máquina CNC (Figura 9-a) e impermeabilizado com selador para madeira. Após, para facilitar a

extração do inserto fundido do pré-molde, foi aplicada uma camada de separador QZ-5100. Antes da fundição com a resina RenCast® 436, foi criada uma camada superficial com a resina RenGel® 426 (Figura 9-c). Tanto para a resina RenCast® 436, como para a RenGel® 426, foi usado o endurecedor RP-150, da mesma linha de produtos Huntsman, nas seguintes proporções: 6% em massa para a resina RenCast® 436 e 10% em massa para a RenGel® 426 [59].

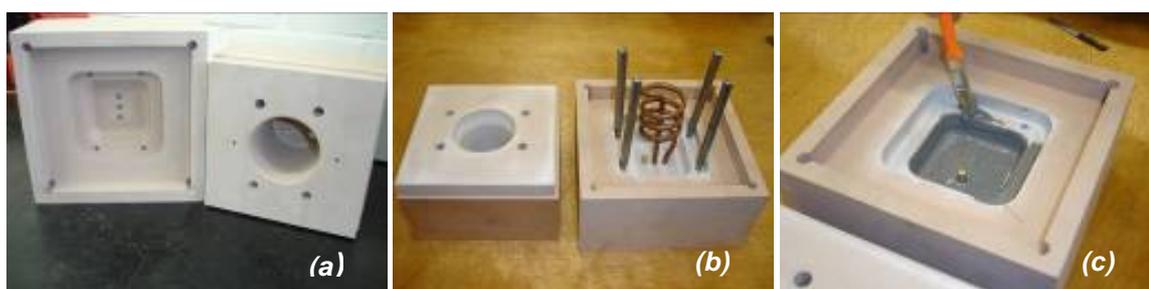


Figura 9 - Algumas etapas do processo de obtenção do inserto macho em resina epóxi

O inserto macho de resina foi desmoldado 24h depois de sua fundição, permanecendo durante esse tempo em temperatura ambiente. A pós-cura foi realizada em forno, inicialmente a uma temperatura de 70°C durante 2 horas e, com acréscimo de 20°C a cada duas horas até a temperatura de 150°C [59].

Os canais de injeção foram obtidos diretamente na fundição da resina, através de um galho já injetado em outra configuração e colado no pré-molde. Para um melhor controle dimensional e de fluxo dentro da cavidade, optou-se por uma usinagem para repassar essa geometria. Essa usinagem, também, foi programada em CAM e feita em máquina CNC, conforme os parâmetros do estudo de Volpato e Amorin [63]. A geometria do galho, assim como do “gate” de entrada do galho na peça podem ser conferidos no anexo X.

3.3.2 Instrumentação do molde

Para a medição da temperatura nas cavidades do molde ao longo do ciclo de injeção, dois termopares tipo “K” (metais base: NiCr⁽⁺⁾ e NiAl⁽⁻⁾) foram instalados no interior dos

machos utilizados. Esses termopares foram alojados em uma região próxima a superfície do macho (aproximadamente 0,35mm) e em duas alturas diferentes na peça (15mm termopar “A” e 45mm termopar “B”). A furação do inserto macho para o alojamento desses termopares foi feita com 3 brocas helicoidais de aço rápido de diâmetro de 2mm, e de comprimentos diferentes (57mm, 95mm e 140mm). Os alojamentos para esses sensores são visualizados na Figura 10. Foi utilizada uma pasta dissipadora de calor para garantir o contato direto entre o termopar e o material do inserto do molde.

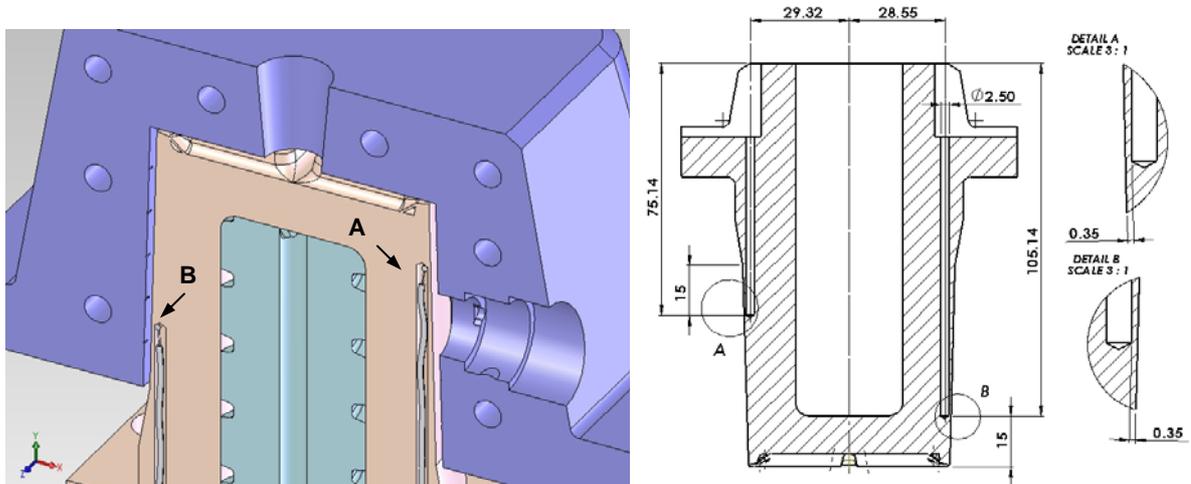


Figura 10 - Posicionamento dos termopares

Neste trabalho, o sistema utilizado para aquisição de dados foi da marca *VISHAY*, modelo *System 5000*. Esse sistema constou basicamente de um condicionador de sinal (*VISHAY 5100*), um computador pessoal (PC), *Pentium MMX®* de 233MHz com 128MB de memória RAM, ao qual foi conectada a placa de aquisição de dados modelo *VISHAY 5101*. Para a visualização dos dados usou-se o programa *Win 5000*.

Em todo o processo de medição existem limitações dadas pelos instrumentos usados, pelo método de medição e pelo observador que realiza a medição. No caso deste trabalho, ao efetuar a medição da temperatura no interior do molde de injeção é necessário que as incertezas experimentais inerentes à mesma sejam relatadas. Dentro das incertezas experimentais é coerente considerar as incertezas relativas à placa de aquisição de dados e aos termopares usados [64].

A Tabela 3 apresenta o grau de incertezas experimentais de acordo com o tipo de termopar usado (tipo K):

Tabela 3 - Grau de incerteza experimental

	<i>Incerteza experimental</i>
Termopar	$\pm 3^{\circ}\text{C}$ (de 0°C a 400°C)
Placa de aquisição de dados	$\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ (a 0°C)

Sendo assim, o grau de incerteza experimental associado a esse trabalho é de $\pm 3,7^{\circ}\text{C}$. O valor da incerteza associada ao termopar (de acordo com as condições do fabricante) é característica dos termopares do tipo K. Quanto à placa de aquisição de dados, a incerteza resulta da precisão na medição da temperatura na junção fria e da conversão A/D da própria placa.

Segundo a referência [65], que usou um sistema de aquisição de dados semelhante ao adotado nesse experimento, para a mesma função (monitoramento de um molde de injeção), a variação máxima encontrada é de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$, quando comparado à medição de um termômetro de mercúrio, em um experimento simples de calibração.

3.4 Geometria do componente injetado e polímero estudado

Para esse trabalho foi definido um produto de material polimérico, com uma geometria bastante típica, que pode apresentar problemas no projeto e na confecção do molde de injeção. Entre alguns desses problemas, pode-se citar a extração da peça, preenchimento incompleto e dimensionamento. Essa geometria possui forma tubular, parede fina e pequeno ângulo de extração (Figura 11). O material é injetado em quatro pontos de entrada para que ocorra um fluxo de material fundido mais homogêneo. Isso é de interesse para as análises (físicas, químicas e mecânicas) posteriores que serão realizadas no componente injetado.

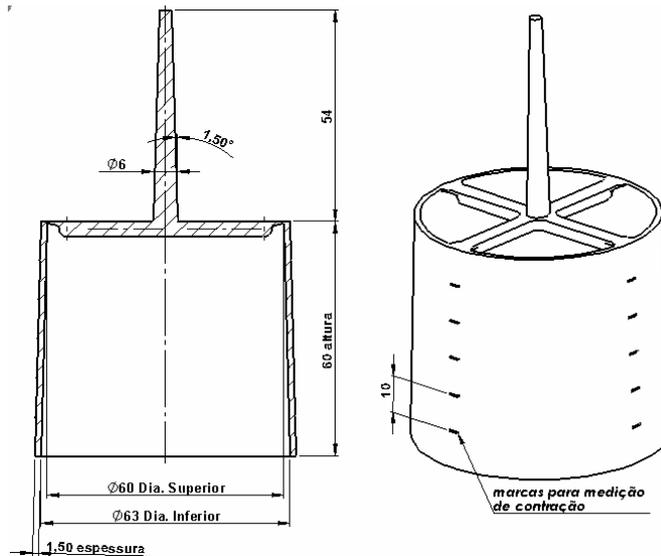


Figura 11 - Produto estudado

O polímero selecionado para esse trabalho foi o polipropileno (PP) Braskem H503, com índice de fluidez de 3.5 g/10min [66]. Esse polímero foi selecionado, pois, como salientado no Capítulo 2, além de ser um polímero semicristalino, apresenta fácil processamento, e baixa degradação. Esse material possui uma ampla literatura, possibilitando que o foco do trabalho não se afaste do proposto. Outras características que justificam a seleção desse polímero são: boa estabilidade no processamento, cinética de cristalização conhecida, além de possuir uma ampla faixa de cristalinidade, podendo ser cristalizado até 90%.

3.5 Variáveis de análise para o experimento

Conforme dito anteriormente, no item 3.3, quatro materiais diferentes foram utilizados nas cavidades do molde experimental, sendo eles: aço AISI P20, Alumínio 7075-T6, Zamak-5, e resina epoxídica RenCast® 436. Somente o material do inserto macho foi alterado, permanecendo a cavidade fêmea com o mesmo material, aço AISI P20, para todos os ensaios. Através das informações sobre as propriedades térmicas dos materiais adotados no projeto das cavidades moldantes, no caso da peça injetada sobre o conjunto AISI-P20 (cavidade fêmea) e Resina (inserto macho) percebe-se que haverá um fluxo preferencial de calor para o lado da

cavidade fêmea devido às propriedades térmicas desse material. Já nos outros conjuntos de cavidades (AISI-P20/Alumínio e AISI-P20/Zamak) o fluxo preferencial de calor será no sentido do inserto macho. Preferiu-se adotar esse tipo de configuração para que um estudo mais detalhado sobre diferenças na morfologia da peça injetada fosse realizado, permitindo uma melhor visualização das paredes de congelamento. Isso também se deve ao curto tempo para a realização desse trabalho, além do alto custo que estaria envolvido para a confecção das cavidades fêmea desses outros materiais.

Além dos materiais, ainda com o intuito de forçar diferenças na morfologia das peças, a temperatura do molde de injeção também foi uma variável alterada. Para esse trabalho o molde foi estabilizado em 30°C, 50°C e 70°C. Como o molde possui sistema de resfriamento tanto para a cavidade fêmea, como para o inserto macho preferiu-se usar ambas na mesma temperatura.

Portanto, doze configurações (quatro materiais x três temperaturas) foram analisadas nesse experimento. Na Tabela 4, a seguir, pode-se observar essas configurações.

Tabela 4 - Configurações estudadas

Material do macho	Temperatura
Aço AISI P20	30°C
	50°C
	70°C
Resina Epoxídica	30°C
	50°C
	70°C
Alumínio 7075-T6	30°C
	50°C
	70°C
Zamak-5	30°C
	50°C
	70°C

Outras variáveis importantes para o desenvolvimento desse trabalho, como por exemplo, tempo de injeção e pressão de injeção e de recalque, foram obtidas via simulação numérica computacional, e serão abordadas no próximo item.

3.6 Simulação numérica computacional

3.6.1 Definição de parâmetros

As simulações computacionais foram realizadas no *software* Moldflow MPI 6.0, sendo simuladas em microcomputador Pentium® 4 HT, de 3.2 GHz e 1 Gb de memória RAM. Um modelo geométrico da peça foi realizado em software de CAD3D (SolidWorks 2004) já com as entradas e o canal de injeção modelados, esse modelo está disponível na Figura 12, a seguir. Após, o modelo foi exportado para o Moldflow no padrão gráfico IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) [29]. O padrão IGES formata o arquivo como texto puro, facilitando a sua migração para qualquer plataforma de computador conhecida [67], e para a geometria em questão, foi a que melhor apresentou resultados no *software* Moldflow®, utilizado nesse trabalho. As marcas de referência para contração foram retiradas para que uma malha de melhor qualidade fosse criada. Esse procedimento em nada afeta o resultado do estudo.

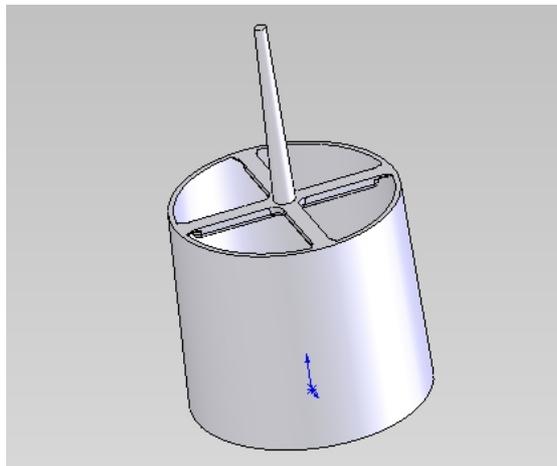


Figura 12 - Modelo em CAD3D da peça estudada

Já no *software* Moldflow®, foi gerada uma malha do tipo *Fusion* [29], com tamanho de elemento de 2mm de comprimento de aresta. Como visto anteriormente, a preparação do modelo é um dos fatores mais críticos para o sucesso da análise, mas como a geometria estudada é simples de ser processada computacionalmente, não houve necessidade de

refinamento de malha pelo operador. A malha gerada apresentou uma qualidade de 97% de confiabilidade (informação obtida pelo aplicativo de diagnóstico de malha do próprio *software*), valor esse já considerado ideal para esse tipo de malha.

O sistema de refrigeração do molde foi modelado diretamente no Moldflow, recriando fidedignamente a situação de resfriamento do molde. A seguir, é apresentado na Figura 13 o modelo para a análise no Moldflow (peça e sistema de resfriamento).

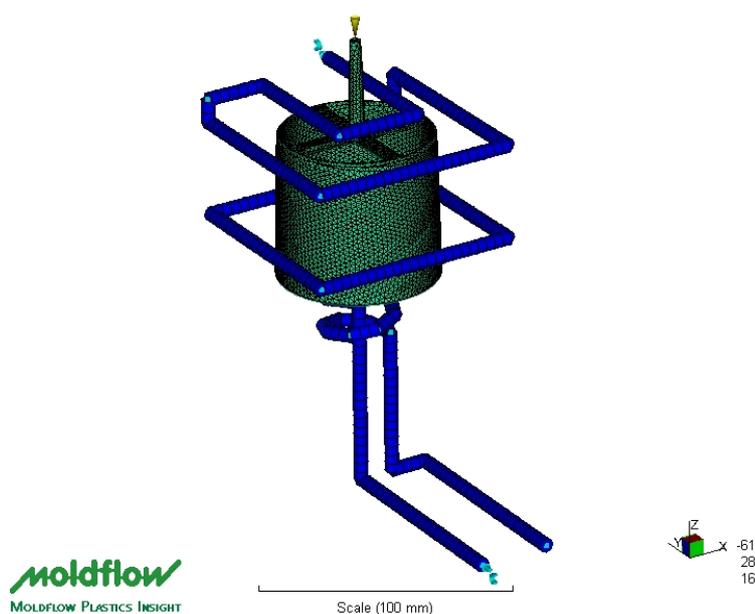


Figura 13 - Modelo simulado no Moldflow

Com base no modelo, as 12 situações diferentes (configurações) foram simuladas computacionalmente com as suas respectivas propriedades térmicas e mecânicas alteradas conforme os valores apresentados na Tabela 5. Foi mantida constante para cada configuração simulada, a temperatura da massa polimérica fundida em 210°C, assim como a pressão do líquido refrigerante, no caso água pura a 2.40 bar.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais usados

Propriedades	AISI P20	Alumínio	Zamak-5	Resina
Densidade [Mg/m ³]	7.80	2.71	6.76	1.75
Calor específico [J/kg.K]	460	782.3	420	1050
Condutividade térmica [W/m.K]	29	138	109	1
Coefficiente de expansão térmica [K ⁻¹]	12x10 ⁻⁶	22.5x10 ⁻⁶	27.4x10 ⁻⁶	60x10 ⁻⁶
Módulo de elasticidade[GPa]	200	70	85	6.86

Nem todas as informações geradas na simulação foram adotadas nesse estudo, sendo que somente as variáveis que possuem relação direta com os objetivos do trabalho foram utilizadas. Nas Figuras a seguir (14, 15, 16, 17 e 18), as informações, resultantes da simulação, para a configuração a 30°C com o macho em aço AISI P20 são visualizadas como forma de ilustrar essas simulações nesse trabalho. Todos os resultados das simulações estão disponíveis para consulta no Anexo 1 desse trabalho.

Interpretando de forma conjunta essas figuras, observa-se que a distribuição da pressão a 99% (Figura 14) mostra que a área preenchida por último localiza-se na borda inferior da peça e, que o preenchimento da peça está balanceado. Já que em todas as regiões dessa borda inferior são alcançadas ao mesmo tempo. Na Figura 15, observa-se a presença de linhas de solda, o software de análise retorna essa informação a partir de uma análise geométrica do modelo de estudo. Para uma interpretação correta da presença de linhas de solda, é necessário que um estudo da temperatura da massa fundida durante o preenchimento seja realizado. Durante todo o preenchimento, o gradiente de temperatura do fluxo frontal em todas as regiões da peça não ultrapassa 10°C (Figura 16). Esta é uma boa condição para que o fluxo de massa fundida se una completamente, eliminando a presença de linhas de solda.

Uma análise conjunta de todas essas informações faz com que o preenchimento da peça seja o mais eficiente (Figura 17), tornando o ciclo de injeção o mais otimizado possível (Figura 18), ou seja, melhor qualidade de peça injetada em um menor tempo de ciclo possível.

A simulação matemática computacional realizada no Mold Flow para as configurações estudadas do inserto macho de AISI-P20 foram adotadas como referencial para as análises realizadas nas outras configurações estudadas.

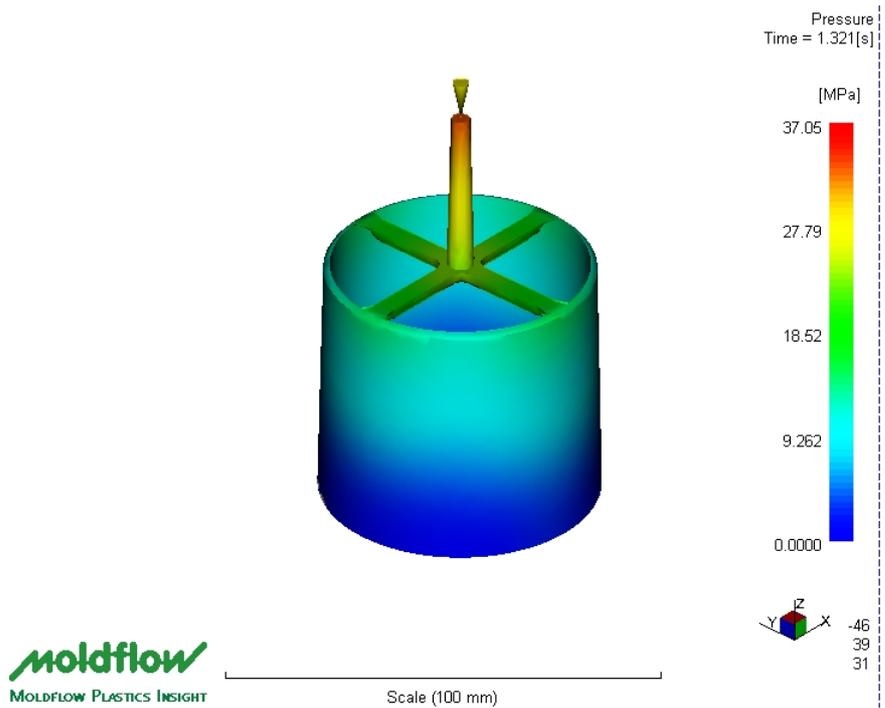


Figura 14 - Simulação de pressão de injeção da configuração AISI P20 a 30°C



Figura 15 - Linhas de solda na configuração AISI P20 a 30°C

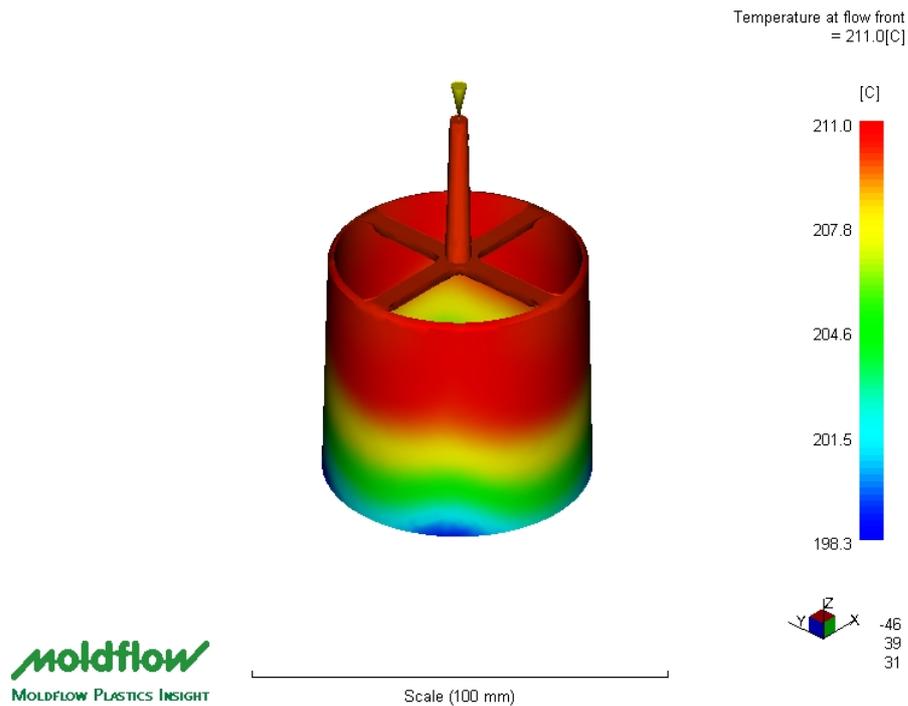


Figura 16 - Simulação de temperatura na frente de fluxo na configuração AISI P20 a 30°C

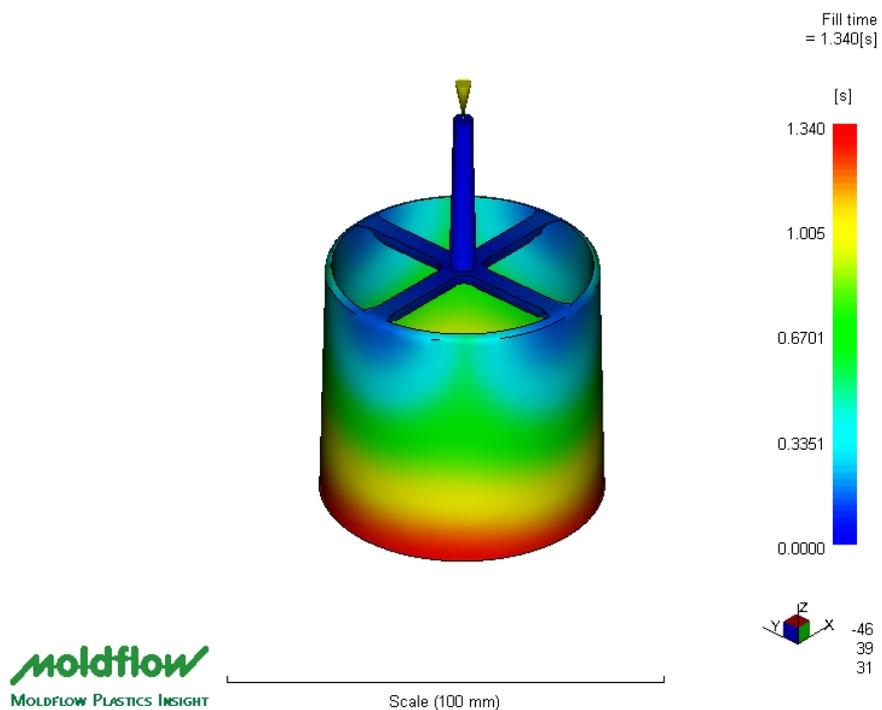


Figura 17 - Simulação de tempo de preenchimento da configuração AISI P20 a 30°C

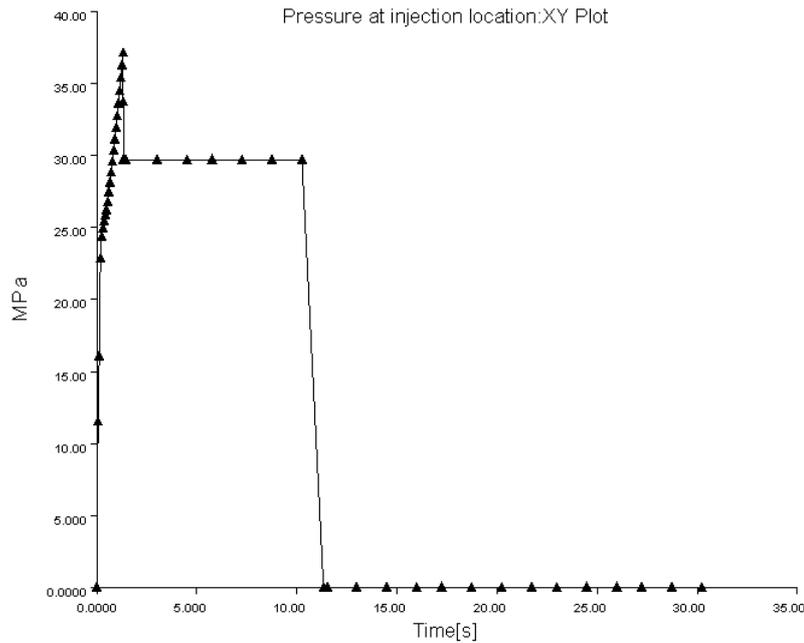


Figura 18 - Gráfico de pressão x tempo de ciclo da configuração AISI P20 a 30°C

3.6.2 Configuração da máquina de injeção com os valores simulados

Após todas as configurações simuladas, os dados foram analisados e a Tabela 6 foi montada para facilitar a programação da máquina injetora. Nessa mesma tabela, também é possível verificar qual a condição que foi utilizada na máquina. Observa-se que, como o CLP da máquina injetora não possui a mesma resolução do *software* da análise, optou-se por arredondar os valores para cima. Em alguns casos, como por exemplo, das configurações a 30°C, houve dificuldades no preenchimento das peças, por isso optou-se por aumentar a pressão de injeção. A velocidade de injeção foi constante para todas as configurações de cada material, e foi determinada de forma experimental. Isso para que houvesse um parâmetro de processo que pudesse ser flexibilizado *in-loco*, caso fosse necessário. Foram mantidas constantes também, as temperaturas de todas as zonas de aquecimento da rosca injetora. Na Tabela 7 encontra-se os parâmetros variáveis nesse experimento e seus respectivos valores. Observa-se nessa tabela, que as temperaturas das zonas de aquecimento da rosca do canhão da máquina injetora foram mantidas constantes (mesmo perfil). Para manter a integridade estrutural da cavidade macho em resina reduziu-se a velocidade de injeção. Essa prática será

melhor explicada a seguir, ainda nesse item.

Ainda sobre a Tabela 7, o programa do CLP da máquina injetora HIMACO, usada nesse trabalho, está configurado a ter como entrada de dados um valor percentual para a velocidade de injeção e para a temperatura da zona final do canhão de injeção (bico). Por isso, o valor da velocidade de injeção é um percentual da relação existente entre a pressão hidráulica máxima, rotação e geometria da rosca de injeção. O valor da temperatura do bico é um percentual da temperatura da zona 2.

Tabela 6 - Parâmetros de processo – Simulação x Execução

	<i>Tempo de injeção MPI [s]</i>	<i>Tempo de Injeção Máquina [s]</i>	<i>Tempo de recalque [s]</i>	<i>Tempo de recalque Máquina [s]</i>	<i>Pressão de injeção MPI [MPa]</i>	<i>Pressão de injeção Máquina [MPa]</i>	<i>Pressão de recalque MPI [MPa]</i>	<i>Pressão de recalque Máquina [MPa]</i>
AISI P20-30°	1.34	1.4	10.0	10.0	37.05	39.0	29.64	30.0
AISI P20-50°	1.44	1.5	10.0	10.0	35.46	36.0	28.37	29.0
AISI P20-70°	1.54	1.6	10.0	10.0	33.42	34.0	26.74	27.0
Resina-30°	2.03	2.0	22.0	22.0	30.01	30.0	18.00	18.0
Resina-50°	2.02	2.0	22.0	22.0	28.50	29.0	17.00	17.0
Resina-70°	2.16	2.2	22.0	22.0	27.03	27.0	16.00	16.0
Alumínio-30°	1.34	1.4	10.0	10.0	37.31	39.0	29.85	30.0
Alumínio-50°	1.44	1.5	10.0	10.0	35.59	36.0	28.47	29.0
Alumínio-70°	1.54	1.6	10.0	10.0	33.57	34.0	26.86	27.0
Zamak-30°	1.34	1.4	10.0	10.0	37.31	39.0	29.85	30.0
Zamak-50°	1.44	1.5	10.0	10.0	35.57	36.0	28.46	29.0
Zamak-70°	1.54	1.6	10.0	10.0	33.57	34.0	26.85	27.0

Tabela 7 - Parâmetros de processos variáveis

<i>Material do macho (30°C, 50°C, 70°C)</i>	<i>Velocidade de injeção</i>	<i>Bico</i>	<i>Temperatura [°C]</i>		
			<i>Zona 2</i>	<i>Zona 3</i>	<i>Zona 4</i>
AISI P20					
Alumínio	65%	60%	210	210	205
Zamak					
Resina	50%	60%	210	210	205

Os valores de pressão de injeção e de recalque, assim como a velocidade de injeção, para as configurações de Resina, foram selecionados dentro dos limites das melhores práticas industriais. Utilizou-se cerca de 20% a menos de pressão de injeção comparado ao usado para a mesma geometria injetada sobre cavidades em aço. Para a pressão de recalque, houve ainda uma redução de 40% sobre a pressão de injeção usada [41, 59]. Essas reduções foram adotadas para que a cavidade em resina fosse preservada, possibilitando um tamanho de lote de peças maior possível.

Isso não pode ser entendido como uma regra geral, sendo que para uma geometria de maior complexidade deve-se iniciar o ciclo de injeção com pressões, tempos e velocidades de injeção abaixo do usual. Após alguns ciclos, essas variáveis devem ser gradativamente aumentadas até uma peça de boa qualidade ser injetada. Todo esse processo necessita de muita habilidade e técnica do operador da injetora.

Quanto aos tempos de ciclos de resfriamento, devido as diferentes propriedades térmicas dos materiais envolvidos nesse projeto, optou-se, em reduzir em 5s o tempo de ciclo de resfriamento para as configurações de 30°C que possuem machos de material metálico. Essa mudança ocorreu a partir da análise feita sobre os dados do *software* de simulação e sobre as propriedades térmicas dos diferentes materiais usados, em específico a condutividade térmica do material. Percebeu-se que devido a essa baixa temperatura (30°C) após esse tempo a cavidade já estaria na temperatura correta para o próximo ciclo. Para as configurações injetadas sobre o macho de Resina, o tempo de ciclo permaneceu constante. Essas mudanças nos tempos de ciclo poderão ser visualizadas nos gráficos de amplitude térmica disponíveis no item 4.2.

3.7 Coleta de amostras

Para todas as configurações, após a preparação da máquina de injeção, 15 peças foram injetadas a fim de que o processo fosse estabilizado termicamente. Após, 30 peças foram

injetadas continuamente e numeradas para as futuras análises (Tabela 8).

Para as configurações com Resina, após os lotes separados, optou-se pela configuração de 50°C para testar a durabilidade do conjunto, onde o experimento continuou até que o inserto macho de Resina apresentasse falhas. Essas análises, juntamente com seus resultados e discussões são apresentadas no próximo capítulo, no item 4.8.2.

Tabela 8 - Amostras e seus respectivos ensaios

Amostra	AISI P20			Resina			Alumínio			Zamak		
	30°	50°	70°	30°	50°	70°	30°	50°	70°	30°	50°	70°
1	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
5	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●
8	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10	○	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○
11	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
12	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●
13	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●
17	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
19	○	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○
20	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
21	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●
22	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●
23	○	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○
24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	○	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○
26	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○
27	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○
28	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●
29	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●
30	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○

Legenda

- DSC
- resistência à tração
- RBS
- resistência ao impacto, dimensional e rugosidade.
- microscopia ótica
- amostras perdidas
- amostras não usadas

3.8 Técnicas adotadas para a caracterização e análise das amostras

3.8.1 Condicionamento dos corpos-de-prova

Previamente às análises, os corpos-de-prova foram expostos às condições padrão, ou seja, temperatura de 20°C e umidade relativa de 50% durante 48 horas, conforme norma ABNT 7452 [68].

3.8.2 Ensaaios mecânicos

Testes, ou ensaios, podem ser definidos como critérios, normas ou procedimentos usados na determinação de propriedades, composição ou desempenho de materiais, produtos, sistemas e serviços que possam ser especificados. Um teste pode medir uma propriedade simples, ou várias propriedades ao mesmo tempo [69, 70]. Nos próximos itens, serão apresentados os ensaios mecânicos mais relevantes para a validação do uso de materiais alternativos em ferramental rápido.

3.8.2.1 Ensaio de resistência à tração

O ensaio de tração é um método utilizado na determinação de propriedades de tensão de plásticos sob norma de corpos de prova prensados ou injetados, testados sob condições definidas de pré-tratamento, temperatura, umidade e velocidade de teste da máquina utilizada. O teste é voltado particularmente para a produção de dados relacionados a propriedades de tensão, que podem ser utilizados no controle e nas especificações qualitativas e trabalhos de pesquisa e desenvolvimento [69, 70].

Nesse trabalho, devido à geometria cilíndrica da peça injetada, ficou inviável a obtenção de um corpo de prova normalizado para o ensaio de tração, devido a isso, foi preferível ensaiar à peça inteira, conforme é demonstrado na Figura 19-a.

Os ensaios para a determinação da resistência à tração foram realizados em equipamento de ensaios universais da fabricante EMIC, modelo EMIC DL 3000 (Figura 19-b), com capacidade de até 30 kN. A velocidade aplicada durante o ensaio foi de 50 mm/min e a célula de carga utilizada foi de 2 kN. Os dados obtidos nesse ensaio foram a força máxima, força na ruptura e as suas respectivas deformações. O dispositivo usado nesse experimento pode ser melhor compreendido através da análise da Figura 20.

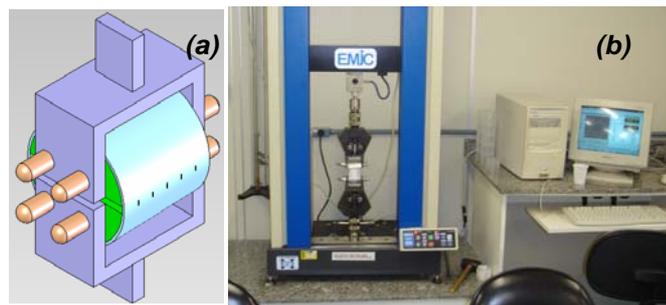
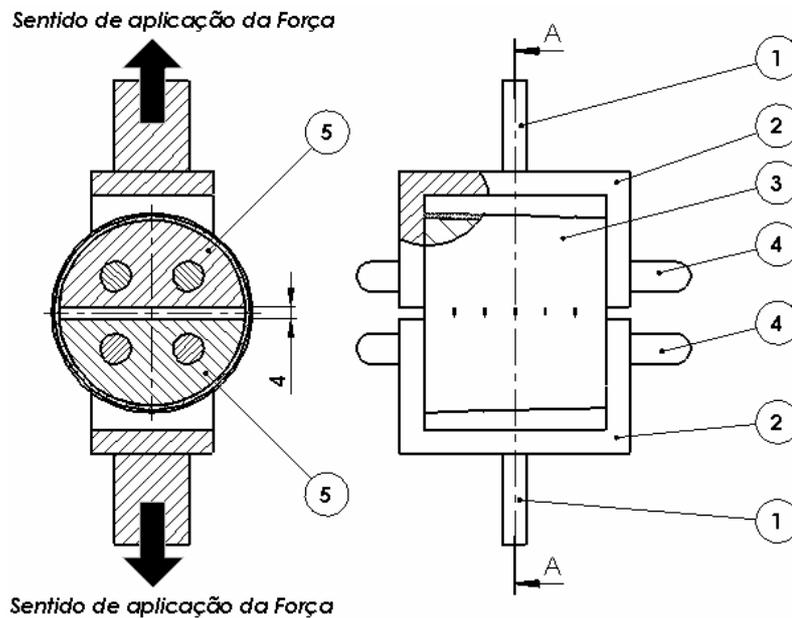


Figura 19 - Ensaio de resistência à tração

Dispositivo desenvolvido (a). Equipamento de ensaio de tração (b) [71]



Número	Descrição	Qt.
1	Suporte da garra	2
2	Estrutura	2
3	Amostra	1
4	Pino de montagem	4
5	Encosto da amostra	2

Figura 20 – Representação esquemática do dispositivo desenvolvido

3.8.2.2 Ensaio de resistência ao impacto - Izod.

O ensaio de resistência ao impacto Izod é um método utilizado para determinar a resistência à quebra de corpos de prova padronizados submetidos ao choque de um pêndulo também padronizado. A resistência ao impacto é definida como sendo a energia necessária para “romper” o corpo de prova [69, 70].

O ensaio de impacto seguiu a norma ASTM D256, exceto quanto à espessura da peça que é inferior à solicitada. O ensaio de impacto em uma máquina *CEAST* modelo *6545/000*, com pêndulo de 1J e velocidade de impacto de 3.46m/s.

Nesse ensaio, preferiu-se analisar de forma distinta a influência de linhas de solda na resistência ao impacto. Dois tipos de amostras, em cada configuração estudada, foram preparados, um com a linha de solda sobre a amostra e em outro a amostra foi cortada sobre a linha de fluxo. Na Figura 21 é demonstrado o gabarito usado para posicionar a amostra, assim como o equipamento utilizado para o ensaio, além da região de retirada das amostras da peça. Os dados obtidos nesse ensaio foram as energias absorvidas [%] e a resiliência [J/m].

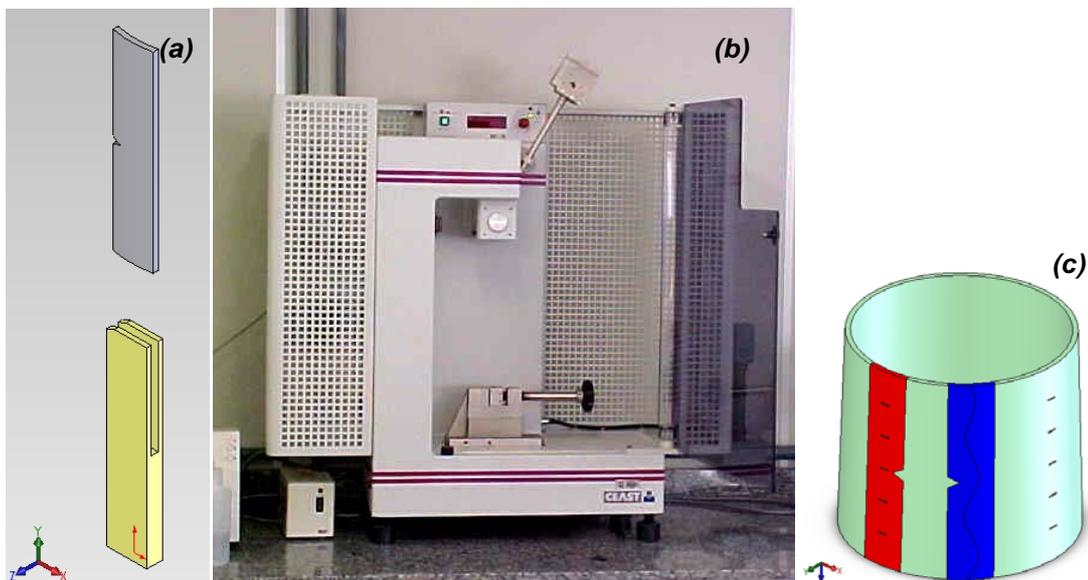


Figura 21 - Ensaio de impacto

Gabarito para posicionamento de amostra (a); Equipamento de ensaio de impacto IZOD (b)[71];

(c)Local da retirada das amostras da peça

3.8.3 Medições dimensionais e de rugosidade

As medidas lineares, realizadas nas amostras, foram obtidas com um paquímetro com leitura digital eletrônica da marca Mitutoyo, de abertura máxima de 200mm e resolução de 0.01mm. Foram analisadas as seguintes medidas na peça:

- Altura, 60mm;
- Diâmetro interno superior, 60mm;
- Diâmetro interno inferior, 63mm;
- Espessura, 1.50mm.

Para a obtenção dessas medidas, cinco amostras de cada configuração foram avaliadas, sendo que cada dimensão analisada foi medida três vezes. A Figura 22 ilustra onde foram realizadas as medições na peça.

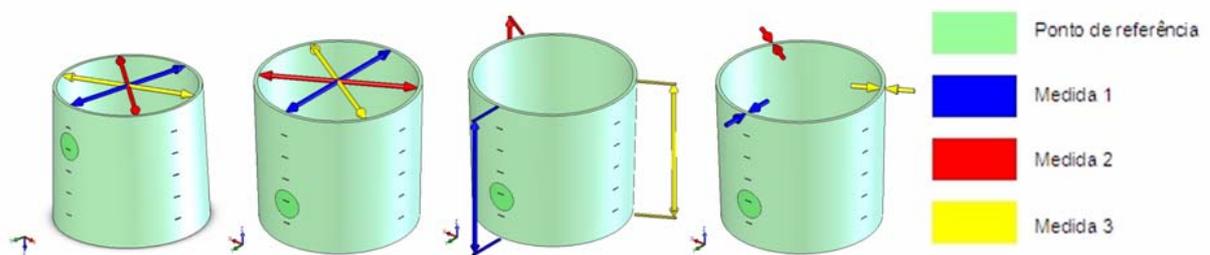


Figura 22 - Representação dos pontos de medição

As medições de rugosidade foram realizadas com um rugosímetro da marca *Taylor-Hobson*, modelo *Surtronic 3+* e os parâmetros utilizados foram: $\lambda_c = 2,5\text{mm}$ (*cut-off*), $L_T = 17,5\text{mm}$ (comprimento total) e $L_M = 12,5\text{mm}$ (comprimento útil) [41]. As medidas de rugosidade foram realizadas tanto nos quatro insertos machos, como nas amostras injetadas. Nas amostras, a análise de rugosidade foi realizada na superfície interna e, nos insertos machos esse ensaio foi realizado na superfície que as molda. Todas as medidas foram realizadas na direção longitudinal das peças e das cavidades e, foram repetidas três vezes em posições diferentes.

Os itens 4.6 e 4.7 apresentam as conclusões sobre essas dimensões e rugosidades medidas e, no Anexo 2 desse trabalho, estão disponíveis para consulta todas essas medidas realizadas.

3.8.4 Análise Térmica – Método da Capacitância Global

Para que haja um melhor entendimento da influência térmica dos materiais envolvidos no molde desse experimento, esse item apresenta uma análise sob o ponto de vista da transferência de calor observada na interface “*material do inserto macho/peça*”. Para tal, essa análise adotará o Método da Capacitância Global. Em síntese, esse método aborda a hipótese de que a temperatura no interior de um sólido é uniforme no espaço, em qualquer instante de tempo durante o processo [72, 73].

Pela lei de Fourier, a condução térmica na ausência de um gradiente de temperatura implica a existência de uma condutividade térmica infinita, porém, tal condição é impossível. Esta simplificação é justificada quando a resistência térmica externa é muito maior que a resistência interna do sistema.

A medida da importância relativa da resistência térmica dentro de um corpo sólido é dada pela razão das resistências interna e externa. Esta razão pode ser escrita na forma adimensional pelo número de *Biot*, calculado por:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \qquad eq. (1)$$

onde:

h = coeficiente convectivo

Lc = dimensão característica

k = coeficiente de condutividade térmica

Nesse caso, em específico, o número de Biot fornece a medida da relação entre a queda de temperatura ao longo do sólido (no caso o inserto macho) e a diferença das temperaturas de sua superfície e do fluido (nesse caso a massa plástica fundida).

Desta forma, quando $Bi \ll 1$, o gradiente de temperatura no sólido é pequeno, ou seja, toda diferença de temperatura encontra-se entre a superfície e a massa plástica fundida. Entretanto, para número de *Biot* moderado para elevados, os gradientes de temperaturas são significativos. Para números de $Bi \gg 1$ a diferença de temperatura ao longo do sólido se torna muito maior do que a diferença de temperaturas entre a superfície e a massa plástica fundida, como mostra a Figura 23.

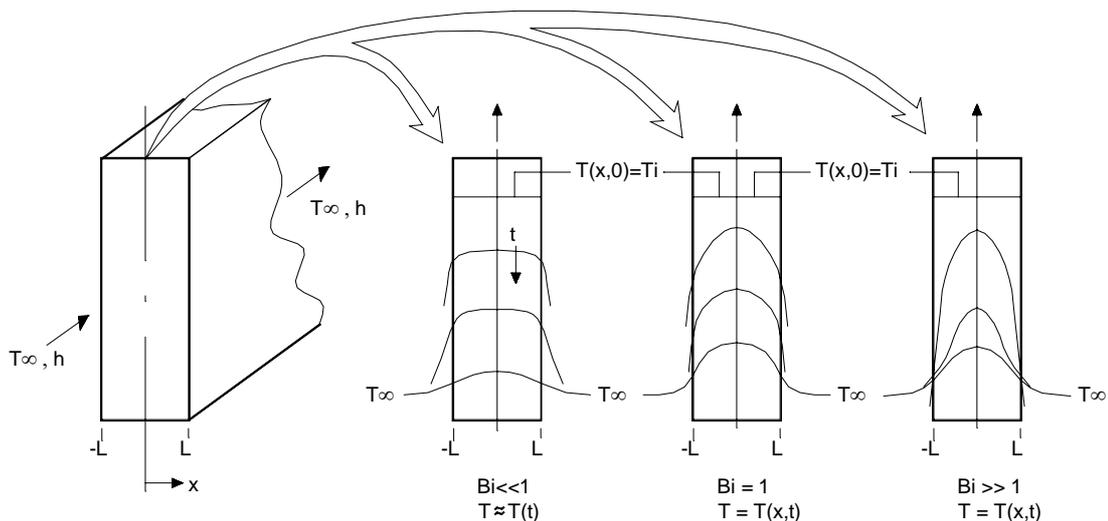


Figura 23 - Distribuição de temperatura em regime transiente para diferente número de Biot em uma parede plana resfriada simetricamente por convecção [73]

Faz-se necessário então, primeiramente definir qual interface será abordada. No caso de um molde de injeção, poder-se-ia determinar o número de *Biot*, para três situações distintas, sendo elas: interface *inserto/polímero*, interface *refrigerante/inserto* e interior do polímero. Nesse trabalho, somente a interface *inserto/polímero* será analisada, sendo o número de *Biot* encontrado menor que 0.1, pode ser aplicado o método da capacitância global, com pequenas margens de erro.

Para esse cálculo é necessário se estimar duas propriedades, o coeficiente de

convecção da água e do polímero. O coeficiente convectivo (h) do polímero torna-se de difícil modelamento matemático, pois ocorrem fenômenos de condução térmica, solidificação e convecção no mesmo material, o que dificulta o entendimento da atuação de cada um e em qual momento cada um está atuando. Para os cálculos de número de *Biot*, que a seguir serão apresentados, foi determinado então, o inverso da resistência térmica do polímero ($1/R_{T_{pol}}$).

Com base no estudo de Scain [72], onde um experimento utilizando o mesmo molde de injeção, material polimérico, e com uma geometria semelhante a utilizada nesse trabalho, o inverso da resistência térmica do polímero encontrada é de aproximadamente $984 \text{ W/m}^2\text{K}$. Substituindo o coeficiente convectivo pelo inverso da resistência térmica do polímero na Equação 3, teremos:

$$Bi = \frac{1/R_{T_{pol}} \cdot L_c}{k_{material}} \quad eq. (2)$$

Os coeficientes condutivos (k) dos materiais utilizados nos insertos macho desse trabalho podem ser visualizados na Tabela 5.

3.8.5 Calorimetria Diferencial de Varredura

O ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) consiste no aquecimento do material analisado a uma taxa constante de velocidade, juntamente com um padrão termicamente inerte (normalmente é utilizado o Coríndon ou Óxido de Alumínio Alfa). São registradas em curvas termo-diferencial ou termograma as diferenças de temperatura entre o padrão e o material em teste. Ocorrem transformações endotérmicas ou exotérmicas, e através da posição, forma e intensidade destes picos torna-se possível a sua identificação [11, 74-76].

São possíveis as seguintes informações com o uso de DSC: determinação de “ T_G ” (temperatura de transição vítrea) e de “ T_M ” (temperatura de fusão), reações químicas de oxidação, degradação, desidratação, diagrama de fases de copolímeros, cristalização e recristalização de polímeros e outros [75].

Para esse trabalho, o DSC foi usado para determinar o grau de cristalinidade do polímero, parâmetro esse de extrema importância quando se trata de uma análise de cinética de cristalização, como a que será realizada para justificar o comportamento mecânico das amostras estudadas.

A caracterização foi realizada em equipamento para a análise de DSC de marca SHIMADZU, modelo 50 (Figura 24). A massa de cada amostra utilizada foi de 10 ± 0.6 mg e, todas as análises foram realizadas com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ em uma atmosfera de nitrogênio e, com fluxo de 50ml/min.



Figura 24 - Equipamento utilizado para análises de DSC [71]

A cristalinidade dos polímeros geralmente é da ordem de 20 a 70% e pode ser determinada por DSC empregando-se a relação:

$$X = \left(\frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^\circ} \right) \times 100 \quad \text{eq. (3)}$$

Onde: $[\Delta H_f]$ é calor de fusão da amostra, $[\Delta H_f^\circ]$ é calor de fusão de um polímero hipoteticamente 100% cristalino, foi utilizado para o PP (100% cristalino) 209 J/g [11, 75, 76].

3.8.6 Microscopia óptica

A partir das micrografias realizadas nesse ensaio será possível, juntamente com as informações do ensaio de DSC, entender o comportamento e a cinética de cristalização das peças injetadas [13]. O entendimento da morfologia dessas peças será de extrema importância na justificativa das propriedades mecânicas observadas nos ensaios mecânicos.

As observações foram feitas com o microscópio de luz polarizada em seções finas com cerca de $15\mu\text{m}$ de espessura. As seções foram cortadas à temperatura ambiente com um micrótomo equipado com lâminas de aço descartáveis e montadas entre uma lâmina e uma lamela de vidro com bálsamo do Canadá. As análises foram realizadas em um equipamento *OLYMPUS* modelo BH2 na Universidade do Minho. A Figura 25 demonstra o local de retirada na peça injetada das amostras para a microscopia, além de demonstrar o ângulo de observação da análise microscópica.

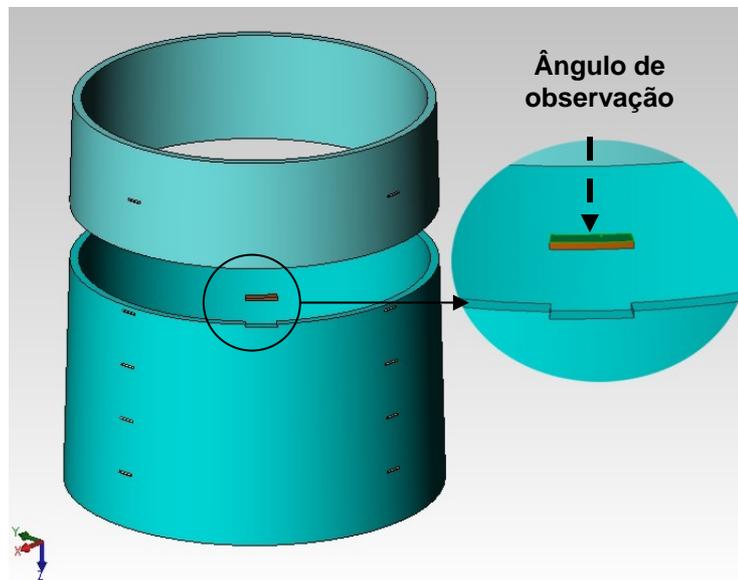


Figura 25- Local de retirada das amostras para microscopia

3.8.7 Espectrometria de Retroespalhamento Rutherford

A técnica de Espectrometria de Retroespalhamento Rutherford (RBS) se baseia nas colisões entre íons e núcleos dos átomos de um sólido a ser analisado. Sendo essa a mais

difundida e mais bem descrita das técnicas de análise com feixes de íons [77]. Essa técnica fornece informações principalmente sobre a composição ou perfil elementar em profundidade do material em análise, podendo detectar até poucas partes por milhão (ppm) elementos pesados e alguns átomos percentuais para elementos leves [78]. Essas informações são obtidas a partir do espectro em energia das partículas retroespalhadas por núcleos no alvo.

As bases da técnica RBS são estabelecidas por quatro grandezas físicas, sendo elas [77]:

- *Fator cinemático K* , que confere à técnica RBS a capacidade de realizar análise elementar qualitativa;
- *Seção de choque de espelhamento*, que é uma medida da probabilidade de ocorrer espelhamento, dando o caráter quantitativo da técnica RBS;
- *Seção de choque de freamento*, que permite a realização de perfilometria com a técnica RBS e,
- *Constante de “straggling”*, que corresponde a flutuações na perda de energia dos projéteis interagindo com a matéria.

Basicamente, a técnica de RBS envolve a medição do número e da energia de partículas retroespalhadas ao atingir átomos de uma amostra na qual o feixe é direcionado. Geralmente, um feixe mono-energético de íons He^{++} ou de prótons (H^+) incide sobre a amostra. Os íons incidentes colidem com os átomos da amostra, perdendo, dessa forma, energia. Algumas partículas são retroespalhadas em um certo ângulo θ . O processo de perda de energia ocorre fundamentalmente devido à transferência de momento do íon incidente para o núcleo do átomo do alvo durante a colisão e pelas diversas interações com os elétrons que ocorrem durante a passagem da partícula através do alvo antes e depois de uma colisão que provoque o retro-espalhamento. Assim, uma partícula que é retroespalhada a uma profundidade d no interior do alvo é detectada com uma energia menor do que uma partícula

retroespalhada na superfície do alvo, devido às interações em seu percurso [79]. A Figura 26 representa de forma esquemática o processo de retroespalhamento dessas partículas.

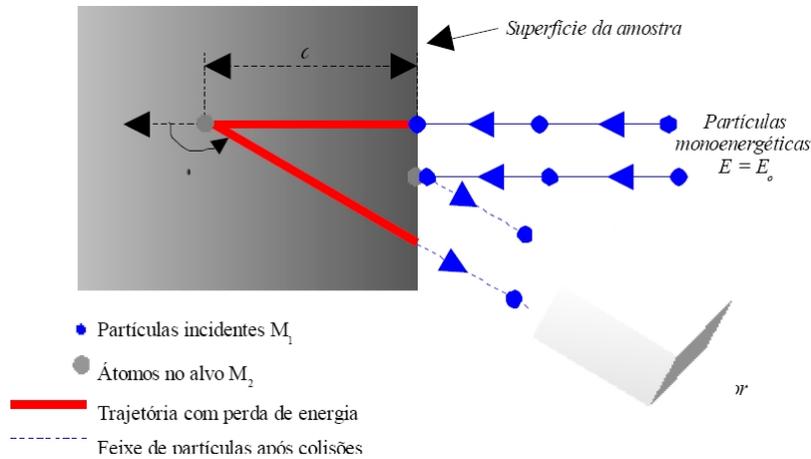


Figura 26 - Representação esquemática do processo de retroespalhamento de partículas [78]

As análises de RBS foram realizadas no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em um acelerador *TANDENTRON* de 3 MV, modelo 4130. Através de análise química RBS, detectou-se a influência de cada material dos insertos machos na superfície da peça injetada, sob o ponto de vista de contaminação por componentes metálicos. Esse tipo de análise, também permite detectar o desgaste do ferramental durante a injeção. Como não foi planejada para esse experimento uma avaliação completa de desgaste de ferramental, esse tipo de análise será recomendado para trabalhos futuros. Mais considerações sobre esse assunto pode ser encontrado no item 4.8.1 do próximo capítulo.

3.9 Considerações Finais

Esse capítulo descreveu os detalhes envolvidos no experimento proposto nesse trabalho, descrevendo o molde intercambiável desenvolvido com quatro insertos machos de diferentes materiais, assim como o seu procedimento de instrumentalização para a obtenção das diferentes amplitudes térmicas. Além do molde, a geometria em forma de tubo, com quatro entradas de fluxo e o polímero utilizado (polipropileno), foram relatados.

Outro item importante explorado nesse capítulo foi como os parâmetros de injeção para o experimento foram simulados, e quais desses parâmetros são importantes para a obtenção de peças injetadas de boa qualidade. E, por fim e não menos importante, nesse capítulo as técnicas de caracterização de polímeros, fundamentais para o entendimento desse trabalho, são detalhadas.

Todos os detalhes descritos nesse capítulo, juntamente com os seus resultados, que serão apresentados e discutidos no próximo capítulo, serão de grande importância para o fechamento desse trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Todos os polímeros podem apresentar diferentes comportamentos, variando-se apenas um parâmetro no processamento, como por exemplo, a temperatura do molde. Essas alterações causam diferenças nas características finais da peça injetada e, além disso, podem ser acentuadas quando se utilizam materiais alternativos nas cavidades de um molde de injeção. Por isso, antes de definir qual material, ou até mesmo os parâmetros de injeção adotados, que serão utilizados no conceito de molde híbrido, deve-se ter conhecimento da influência desses na peça final a ser injetada.

O Capítulo 2 desse trabalho aborda esses parâmetros de processo e suas influências nas peças plásticas injetadas. Desta forma, no contexto desse trabalho, foram realizados ensaios, conforme o descrito no Capítulo 3, e nesse momento os resultados desses ensaios são analisados e discutidos, conforme proposto nos objetivos específicos finais citados no Capítulo 1. Foram realizados ensaios para avaliar a morfologia e cristalinidade de um polímero, no caso específico desse trabalho, o polipropileno. Os resultados desses ensaios são importantes quando se procura entender o comportamento mecânico, dimensional e visual de uma peça plástica. Além disso, nesse capítulo também são apresentados os resultados dos ensaios de durabilidade dos elementos moldantes e de contaminação do polímero por metais.

4.2 Análise térmica do molde

Esse estudo foi realizado para a verificação do comportamento térmico de cada material usado nos machos utilizados no experimento. Os resultados que a seguir são apresentados foram obtidos durante cinco ciclos completos e consecutivos de injeção de cada configuração, através dos termopares instalados no molde, conforme proposto no item 3.3.2.

Os próximos subitens apresentam esses resultados, e as figuras apresentadas nesses subitens representam o ciclo de injeção das amostras 5 a 10 de cada configuração.

4.2.1 Análise térmica do macho de AISI P20

Na Figura 27 observa-se os cinco ciclos de injeção monitorados, e aqui mostrados como exemplo de cada configuração injetada usando o macho de AISI P20. Observa-se também, que o tempo de ciclo para a configuração a 30°C é de 30s e os demais são de 35s. Esse redução no tempo de ciclo de resfriamento está melhor explicada no item 3.6.2.

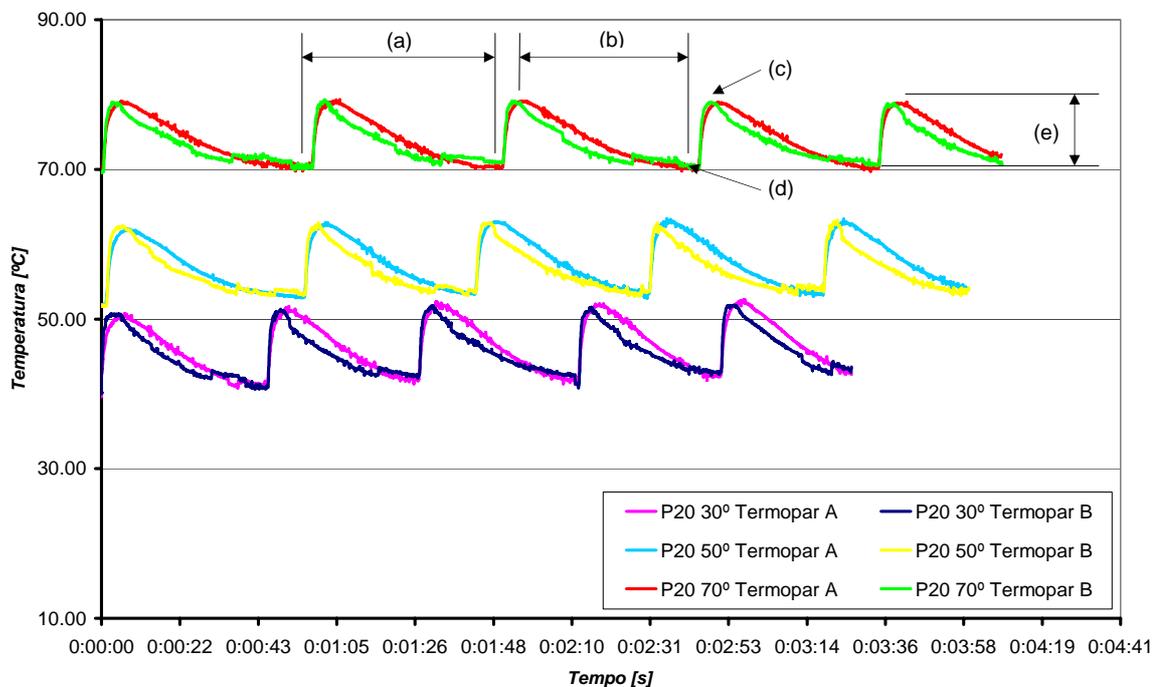


Figura 27 - Análise térmica do ciclo de injeção sobre o macho de AISI P20

Esse tipo de curva, conhecida como “dente de serra”, devido ao seu formato, e que serão apresentadas nessas figuras de amplitude térmica, representam: o tempo total do ciclo de injeção (a); tempo do ciclo de resfriamento (b); além da temperatura máxima que o inserto macho está no momento da injeção (c); temperatura de estabilização térmica do molde (d) e, amplitude térmica (e). A identificação dessas informações pode ser visualizada na Figura 27 sobre a curva de 70°C do termopar “A”.

A amplitude é a diferença da temperatura medida no momento em que inicia o ciclo de injeção (d) até a temperatura medida no momento de preenchimento da cavidade (c), onde o material fundido, que está a uma temperatura mais alta entra em contato com a superfície da cavidade. A partir desse momento, inicia-se o ciclo de resfriamento da peça (b). Observa-se que, para essas configurações de AISI P20, com o aumento da temperatura do molde há um decréscimo da amplitude. Essa característica poderá ser visualizada também nas configurações com os outros materiais dos insertos macho.

Como observado na Figura 27, a estabilização da temperatura do molde a 30°C e 50°C ocorreu a aproximadamente 41°C e 53°C, respectivamente, devido a problemas técnicos na regulagem do termoregulador.

Na Tabela 9 encontra-se as amplitudes de temperatura de cada configuração injetada sobre o macho de aço AISI P20. Como houve diferenças maiores que a incerteza experimental medida, no caso das amplitudes térmicas para as peças injetadas sobre o inserto macho de aço AISI P20, a tabela de amplitude térmica apresentada diferencia a temperatura simulada da temperatura real do experimento.

Tabela 9 - Amplitude térmica na análise de AISI P20

<i>Temperatura simulada</i>	<i>Temperatura Real ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>Termopar A</i>	<i>Termopar B</i>
30°C	41°C	9.85 \pm 0.32	9.22 \pm 0.55
50°C	53°C	9.11 \pm 0.24	9.08 \pm 0.18
70°C	70°C	8.38 \pm 0.16	8.23 \pm 0.15

A temperatura medida no termopar “A” é mais alta devido ao fato desse termopar estar localizado em uma região de pior troca térmica na cavidade do molde, perto do bico de injeção. Assim como a temperatura, essa amplitude também é mais alta devido ao posicionamento do termopar. Isso ocorre porque nessa região o material fundido entra em contato com a região do termopar “A” quando ainda está numa temperatura elevada. Depois

desse ponto, a temperatura do fundido começa a cair devido ao contato com a parede fria da cavidade.

4.2.2 Análise térmica do macho de Resina

Devido às altas amplitudes térmicas apresentadas nas configurações de Resina, para uma melhor visualização, os gráficos de cada configuração são exibidos separadamente. Cada uma das Figuras a seguir (28, 29 e 30) representa uma temperatura de estabilização do molde. Ao contrário das análises térmicas realizadas nos outros materiais (AISI P20, Alumínio e Zamak), conforme relatado no item 3.6.2, para as configurações de Resina o ciclo total de injeção foi definido com o mesmo tempo para todas as configurações de temperatura (120s). Baseado na análise computacional, o ciclo de injeção para esse tipo de material de cavidade deve ser mais longo, já que a resina epoxídica é um isolante térmico e, uma diferença de 5 ou 10 segundos pouco faria diferença.

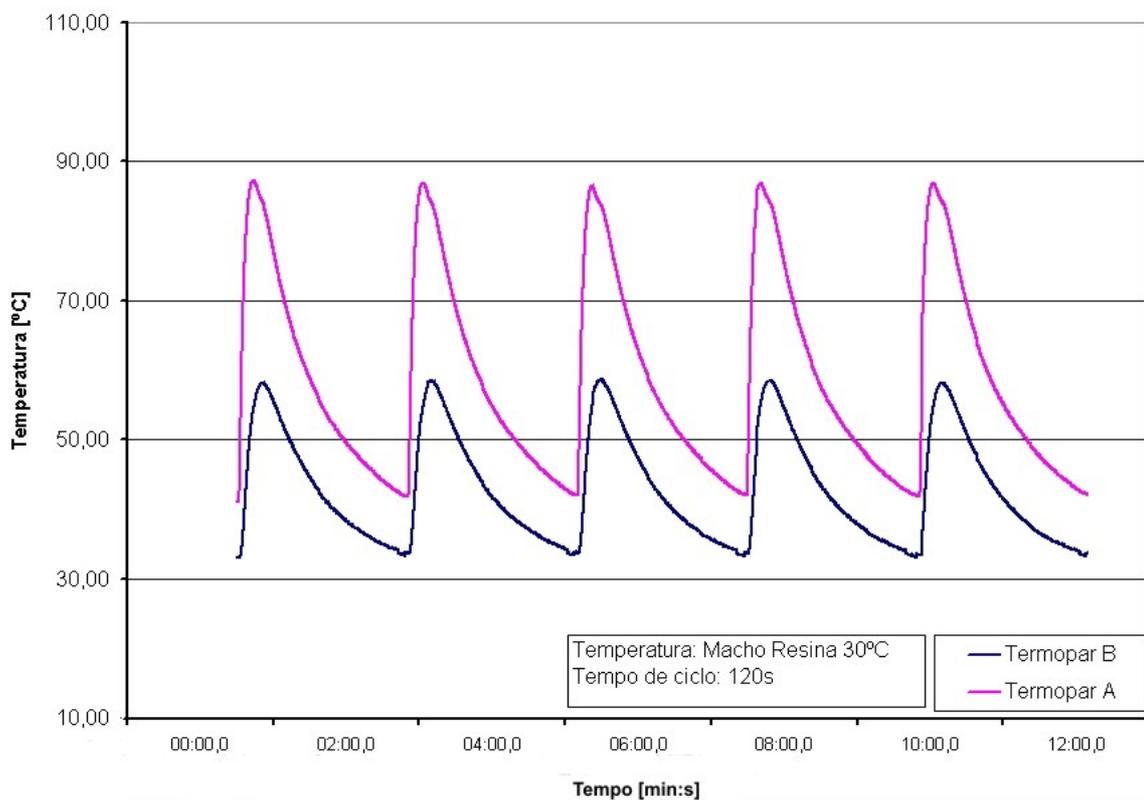


Figura 28 - Análise térmica do ciclo de injeção sobre o macho de Resina na temperatura de 30°C

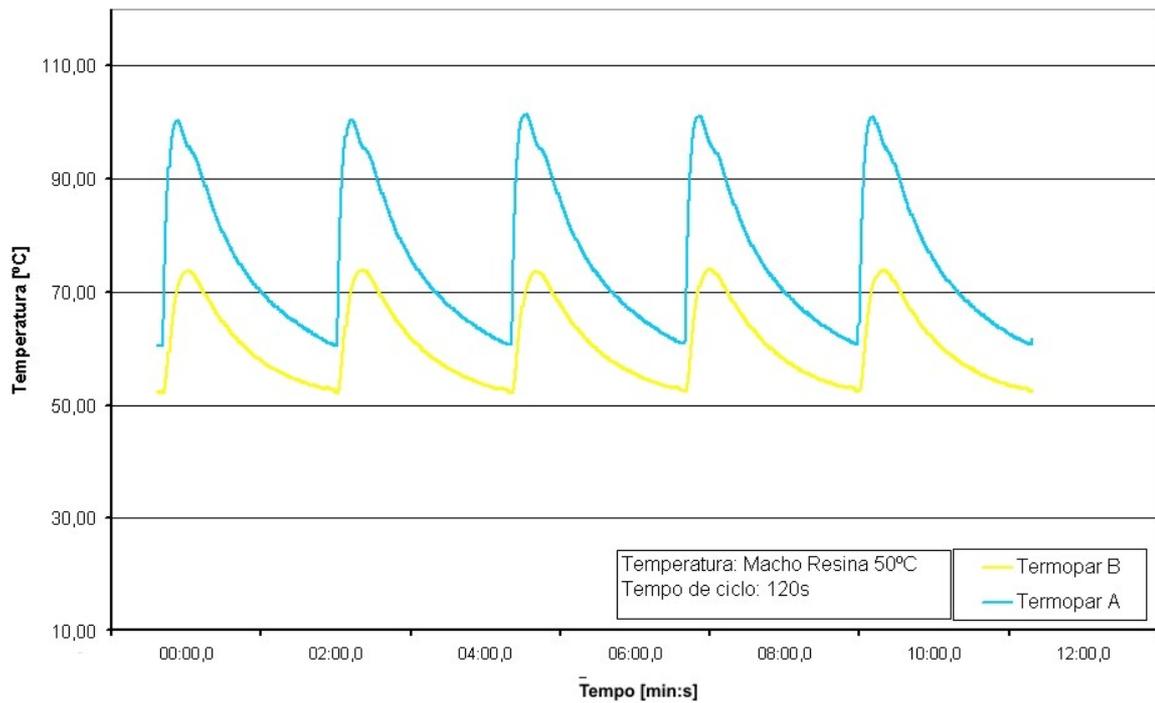


Figura 29 - Análise térmica do ciclo de injeção sobre o macho de Resina na temperatura de 50°C

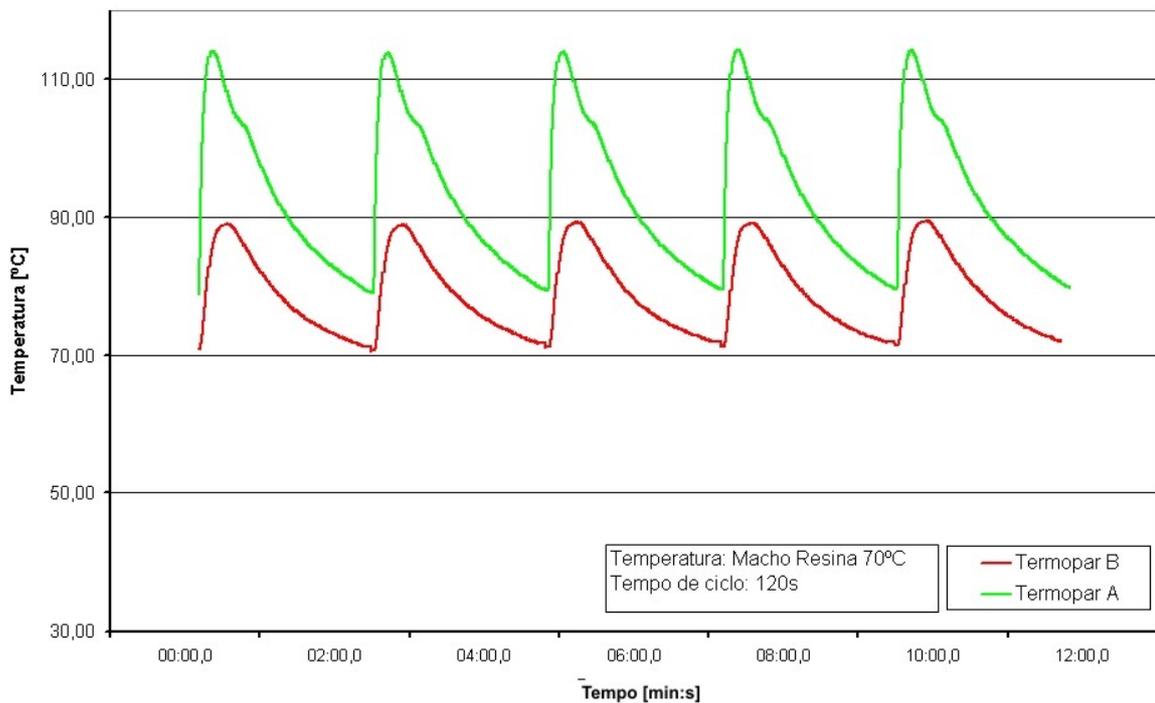


Figura 30 - Análise térmica do ciclo de injeção sobre o macho de Resina na temperatura de 70°C

Com base nas Figuras 28, 29 e 30 pode-se observar que o material usado no inserto macho de Resina possui baixa condutividade térmica. Evidencia-se esse fato quando a análise das temperaturas dos termopares é feita de forma separada. O termopar “A”, nesse inserto,

está alojado em uma região com pouca troca de calor, conforme relatado no item 3.3.1. Isso influencia o comportamento térmico, gerando amplitudes térmicas maiores na região do termopar “A”, além do que nessa região a estabilidade térmica não é alcançada. Observa-se que na região do termopar “B”, por essa apresentar melhor refrigeração, a amplitude medida foi inferior à medida na região do termopar “A”. Esses valores de amplitude podem ser conferidos na Tabela 10. O aumento do tempo de ciclo de resfriamento seria uma solução viável e simples para que a temperatura na região do termopar “A” estabilizasse, mas como a região do termopar “B”, com o ciclo de 120s já estava estabilizada, optou-se por manter esse mesmo valor.

Tabela 10 - Amplitude térmica na análise de Resina

<i>Temperatura</i>	<i>Termopar A</i>	<i>Termopar B</i>
30°C	44.18 ±0.13	24.43 ±0.05
50°C	39.25 ±0.22	20.73 ±0.15
70°C	33.98 ±0.23	17.38 ±0.19

4.2.3 Análise térmica – Alumínio e Zamak

O comportamento térmico dos machos de Alumínio e de Zamak apresentaram características semelhantes, por isso as configurações estudadas envolvendo esses dois materiais serão apresentadas e discutidas conjuntamente. Nas Figuras 31 e 32 apresentam-se as variações de temperatura para os cinco ciclos de injeção monitorados para o macho de Alumínio e Zamak, respectivamente.

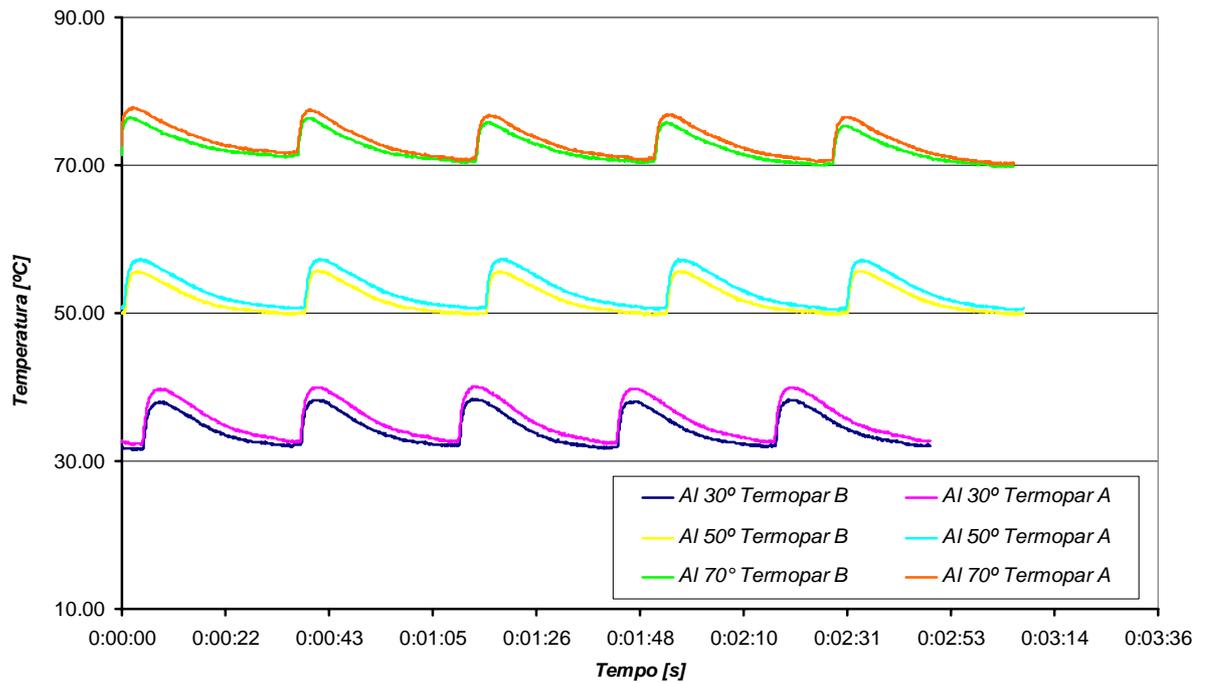


Figura 31 - Análise térmica do ciclo de injeção sobre o macho de Alumínio

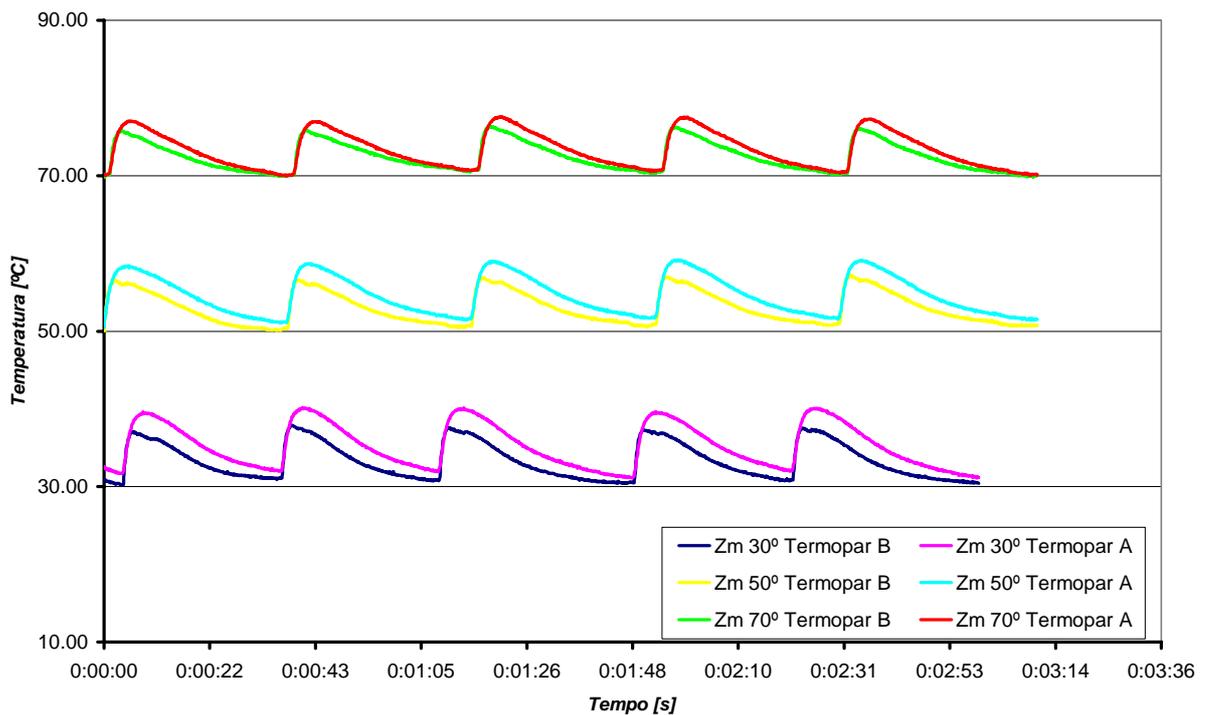


Figura 32 - Análise térmica do ciclo de injeção sobre o macho de Zamak

Quando comparados às análises térmicas do macho de aço AISI P20 e, principalmente de Resina, verifica-se que as amplitudes térmicas, tanto das configurações em Alumínio como as de Zamak, apresentam valores menores. Isso é devido a esses materiais apresentarem uma

condutividade térmica muito superior a dos primeiros materiais analisados. Na Tabela 11, os valores de amplitude térmica para as configurações de Alumínio e Zamak são apresentados.

Tabela 11 - Amplitude térmica na análise de Alumínio e Zamak

Material do Macho	Temperatura	Termopar A	Termopar B
Alumínio	30°C	7.09 ±0.12	5.97 ±0.13
	50°C	6.48 ±0.04	5.53 ±0.02
	70°C	5.88 ±0.04	5.26 ±0.13
Zamak	30°C	7.87 ±0.29	6.37 ±0.26
	50°C	7.11 ±0.06	5.86 ±0.04
	70°C	6.58 ±0.27	5.41 ±0.22

Assim como nos outros materiais estudados nesse trabalho, a amplitude térmica desses dois materiais também decresceu com o aumento da temperatura do molde.

4.2.4 Conclusões sobre a análise térmica

Através do Método da Capacitância Global, visto no item 3.8.4, foi calculado o número de Biot para os diferentes materiais usados no inserto macho. A Tabela 12 a seguir, apresenta esses valores.

Tabela 12 - Cálculo do número de Biot

Material da cavidade macho	Temperatura [°C]	Condutividade térmica [W/mK]	Espessura da peça [mm]	Número de Biot
AISI P20	30/41	29	1.46	0.0495
	50/53		1.44	0.0489
	70		1.44	0.0489
Resina	30	1	1.50	1.4760
	50		1.50	1.4760
	70		1.49	1.4662
Alumínio	30	138	1.40	0.0100
	50		1.45	0.0103
	70		1.44	0.0103
Zamak	30	109	1.45	0.0131
	50		1.41	0.0127
	70		1.43	0.0129

Observa-se a partir dos dados calculados e apresentados na tabela anterior, que para os materiais metálicos (Aço AISI P20, Alumínio e Zamak) utilizados no inserto macho, o

número de *Biot* apresentado é menor que 0.1. Já para o inserto macho em Resina o número de *Biot* calculado foi de aproximadamente 1.47. Como a resistência térmica foi considerada constante para a interface *inserto/polímero*, e a dimensão característica também é praticamente uma constante, a diferença de condutividade térmica entre a resina epoxídica e os materiais metálicos é o principal fator determinante do número de *Biot*. Isso explica as diferenças apresentadas nas amplitudes térmicas medidas nesse experimento, principalmente nas configurações de peças injetadas sobre o macho de resina.

A capacidade de transferência de calor do conjunto *polímero-inserto-refrigerante* é função da soma das resistências térmicas de cada um desses elementos. Quando um dos elementos desse conjunto apresenta uma alta resistência térmica, a resultante será praticamente essa resistência, ou seja, a capacidade de resfriamento é ditada pela capacidade de transferir calor desse elemento. Essa afirmação pode ser observada nas análises térmicas das configurações do inserto macho de Resina, o qual apresenta um maior tempo de ciclo de injeção.

4.3 Morfologia

Os próximos subitens apresentam as micrografias realizadas nas amostras de todas as configurações estudadas. Essas micrografias apresentam a estrutura cristalina de onde se pode observar o tamanho e tipo dos esferulitos, linhas de fluxo, o comportamento do polímero nas paredes de congelamento e núcleo da peça. Esses fatores observados são importantes na conclusão desse trabalho, pois juntamente com o grau de cristalinidade (item 4.4, a seguir) pode-se explicar o comportamento mecânico das amostras.

4.3.1 Morfologia das peças injetadas sobre o macho de AISI P20

Na Figura 33, estão ilustradas as micrografias das amostras injetadas sobre o macho de AISI P20. O lado representado pela seta como externo é o lado injetado sobre da cavidade

fêmea de aço AISI-P20.

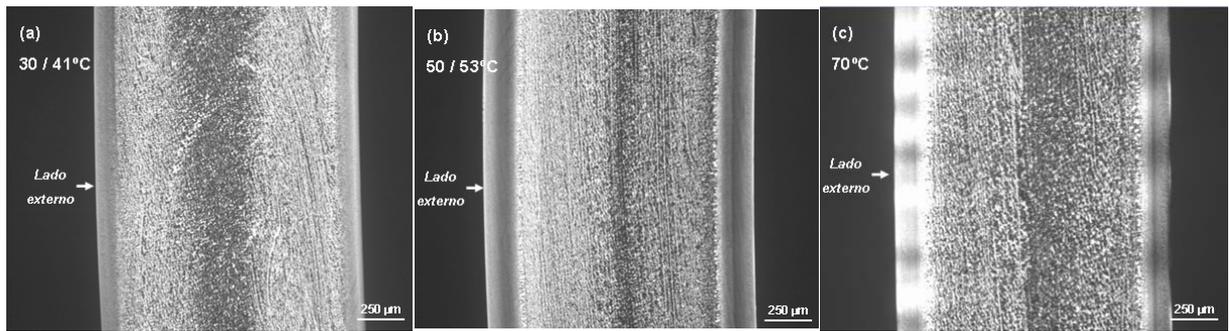


Figura 33 - Micrografias das amostras injetadas sobre o macho de AISI P20

A amostra injetada a 30/41°C apresenta paredes de congelamento bem definidas, apresentando em quase toda a extensão, uma estrutura esferulítica muito fina. O núcleo apresenta evidência das linhas de fluxo com “turbulência” que se revelam pela presença de cristalização com alinhamento molecular em linha. A estrutura esferulítica do núcleo é genericamente mais fina do que nas amostras da mesma série, injetadas com temperaturas de molde maiores (50/53°C e 70°C).

As amostras injetadas a 50/53°C e 70°C apresentam esferulitos na zona de transição parede/núcleo que crescem de dimensão com a temperatura do molde. Outra diferença, relativa à amostra injetada a 30°C, é de que as linhas de cristalização que apresentam orientação molecular em linha perdem a forma parabólica e tornam-se paralelas às paredes da cavidade.

De uma forma geral, nota-se em todas as amostras das configurações de macho de aço AISI-P20 um aumento ligeiro das dimensões da estrutura cristalina do lado da cavidade fêmea, que também é de aço AISI-P20.

4.3.2 Morfologia das peças injetadas sobre o macho de Resina

Na Figura 34 pode-se observar as micrografias das amostras injetadas sobre o macho de Resina. O lado representado pela seta como externo é o lado injetado sobre da cavidade fêmea de aço AISI-P20.

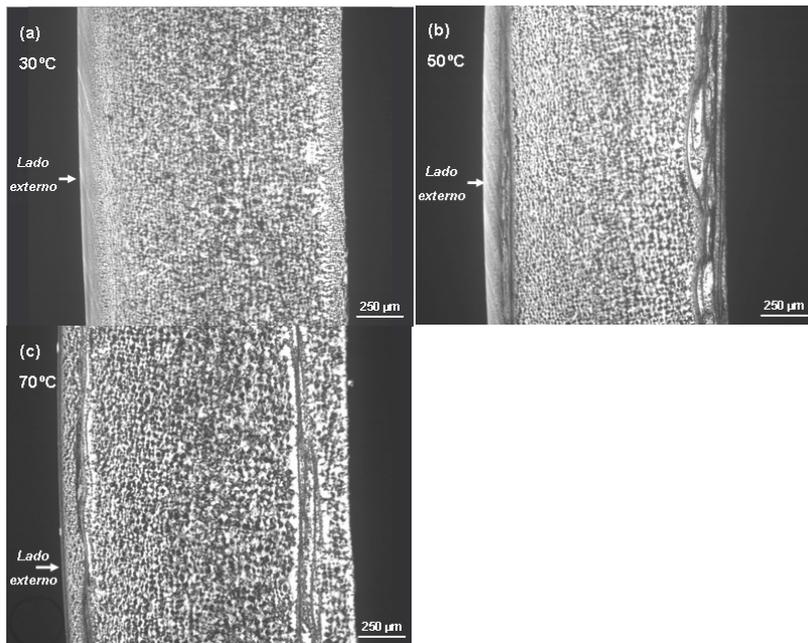


Figura 34 - Micrografias das amostras injetadas sobre o macho de Resina

Do lado da peça injetada sobre o macho de resina a parede tem uma fraca orientação molecular, mesmo no caso da amostra injetada a 30°C. À medida que a temperatura do molde sobe aumenta a ocorrência de cristalização com orientação molecular em linha de ambos os lados, o que revela a influência da orientação molecular do fundido na cristalização posterior do material. Ainda, do lado injetado sobre a Resina observa-se que essa cristalização dá origem a bandas transcristalinas de dimensões elevadas. As amostras de todas as configurações de Resina apresentam núcleo com estrutura grosseira e uniforme.

4.3.3 Morfologia das peças injetadas sobre o macho de Alumínio

Na Figura 35, a seguir, as micrografias das amostras injetadas sobre o macho de Alumínio estão ilustradas. O lado representado pela seta como externo é o lado injetado sobre da cavidade fêmea de aço AISI-P20.

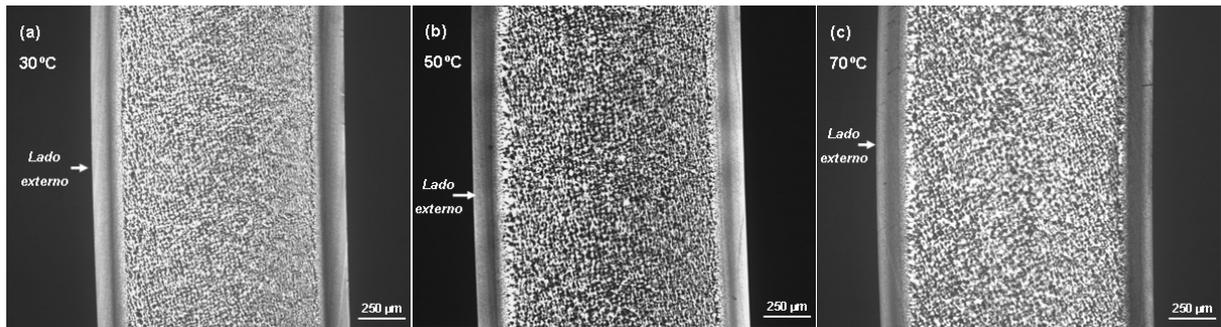


Figura 35 - Micrografias das amostras injetadas sobre o macho de Alumínio

Todas as amostras injetadas sobre o macho de Alumínio apresentam uma estrutura parede/miolo bem definida, cuja parede vai diminuindo ligeiramente de largura com o aumento de temperatura ao mesmo tempo em que se torna mais esferulítica. Não se observam estruturas com orientação molecular em linha no núcleo, que apresenta uma estrutura esferulítica normal e de dimensões bastante uniformes ao longo de toda a espessura.

Nas configurações de Alumínio o tempo de resfriamento foi reduzido devido as melhores propriedades térmicas desse material, principalmente o coeficiente de condução térmica.

4.3.4 Morfologia das peças injetadas sobre o macho de Zamak

As amostras injetadas sobre o inserto macho de Zamak apresentam paredes bem definidas, de dimensões e aparência semelhante de ambos os lados, que se vão tornando cada vez mais esferulíticas à medida que a temperatura sobe. A transição para o núcleo se faz de uma forma suave (principalmente na temperatura de 30°C) com os esferulitos crescendo progressivamente na direção do centro da peça. Os esferulitos encontrados no núcleo dessas peças apresentam formação grosseira. Na Figura 36, estão ilustradas as micrografias das amostras injetadas sobre o macho de Zamak. O lado representado pela seta como externo é o lado injetado sobre da cavidade fêmea de aço AISI-P20.

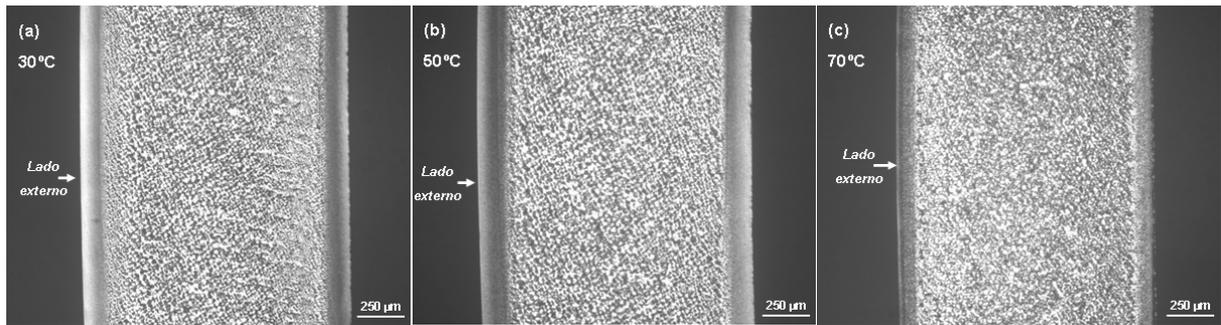


Figura 36 - Micrografias das amostras injetadas sobre o macho de Zamak

Assim como nas amostras injetadas sobre as configurações de Alumínio, a estrutura esferulítica apresentada na parede de congelamento sugere que o resfriamento foi um pouco mais rápido do lado injetado sobre o inserto macho de Zamak do que do aço AISI P20 usado na cavidade fêmea do molde.

4.4 Cristalinidade

As Figuras do Anexo 3 correspondem, respectivamente, aos termogramas de DSC do material injetado usado nesse trabalho (PP), referentes à primeira corrida térmica para a determinação de cristalinidade. Na Tabela 13 encontra-se, em resumo, o valor de cristalinidade obtido para cada uma das configurações estudadas. Esse valor foi obtido através da Equação 3 (item 3.8.5). Para o valor do calor de fusão do polipropileno (100% cristalino) adotou-se 209 J/g [75, 76].

No caso desse trabalho, o grau de cristalinidade ou percentual de cristalinidade, como visto anteriormente no Capítulo 2 (itens 2.2.3 e 2.2.4), depende de alguns fatores, entre eles estruturais, presença de uma segunda molécula (ou fase) e das condições de processamento, que foi o caso desse trabalho. Somente as condições de processamento foram alteradas no experimento, afetando assim, a cinética de cristalização do polímero estudado.

Tabela 13 - Grau de cristalinidade das amostras

<i>Material do macho</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	<i>ΔH_f [J/g]</i>	<i>% de cristalinidade</i>
AISI P20	30 / 41	82.12	39.29%
	50 / 53	85.64	40.97%

	70	85.52	40.91%
Resina	30	81.89	39.18%
	50	82.38	39.41%
	70	82.91	39.66%
Alumínio	30	81.09	38.79%
	50	83.64	40.02%
	70	83.91	40.14%
Zamak	30	81.12	38.81%
	50	83.60	40.00%
	70	83.05	39.74%

Quanto à temperatura do molde, observa-se que nas configurações a 30°C o grau de cristalinidade é menor devido ao menor tempo de resfriamento. Para as outras configurações de 50°C e 70°C, observa-se um valor semelhante para o grau de cristalinidade. Na configuração de Resina 30°C, essa variação diminuiu, pois o ciclo de injeção é o mesmo (120s) para as três temperaturas usadas para esse material. O grau de cristalinidade para todas as amostras injetadas sobre o inserto macho de Resina é menor que o grau das outras configurações, pois além do maior tempo de ciclo de injeção, a velocidade de injeção também foi reduzida, como apresentado no item 3.6.2 e explicado no item 2.2.4.1. Além disso, devido às diferentes propriedades térmicas dos materiais envolvidos nessas configurações de Resina (aço AISI-P20 na cavidade fêmea e Resina no inserto macho) houve influência do material da cavidade fêmea na transferência de calor durante o resfriamento. Outro ponto a ser discutido, justificando esse comportamento de cristalinidade apresentado nas configurações injetadas sobre o inserto de macho de Resina, são as diferentes condições de processamento adotadas nessas configurações (menores pressões e velocidades de injeção).

4.5 Análises Mecânicas

A cristalinidade, morfologia e orientação molecular originada durante o processo completo de injeção, afetam as propriedades mecânicas da peça. Aumentando-se o grau de cristalinidade obtêm-se as seguintes alterações nas propriedades da peça injetada: aumento da

resistência à tração, redução da resistência ao impacto, aumento da contração. Outras propriedades também são afetadas pelo grau de cristalinidade do polímero, mas para esse trabalho somente as citadas anteriormente são abordadas.

Os próximos subitens apresentam os ensaios mecânicos realizados para esse trabalho relacionando-os com as informações morfológicas apresentadas anteriormente.

4.5.1 Ensaio de resistência à tração

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração são apresentados na Tabela 14. Analisando de forma comparativa, em relação às amostras das configurações do aço AISI P20, houve uma redução na força máxima suportada pelas amostras das configurações de Resina, Alumínio e Zamak, sendo que as injetadas sobre a Resina essa redução foi de aproximadamente 15%, seguidas das injetadas sobre o Alumínio (~9,5%) e das amostras injetadas sobre o Zamak (~6%). Um comparativo do comportamento apresentado pelas diferentes configurações estudadas, quanto à resistência à tração, pode ser visualizado no gráfico da Figura 37.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de resistência à tração

<i>Amostra</i>	<i>Força Máxima [N]</i>	<i>Força Ruptura [N]</i>	<i>Deformação Força máx [mm]</i>	<i>Deformação na Ruptura [mm]</i>
AISI P20 30 / 41°C	5672 ± 2.71	3950 ± 7.15	7.23 ± 0.12	10.39 ± 0.19
AISI P20 50 / 53°C	5628 ± 0.35	3643 ± 56.95	7.18 ± 0.13	19.01 ± 5.58
AISI P20 70°C	5663 ± 3.11	4816 ± 53.89	6.67 ± 0.11	10.78 ± 3.44
Resina 30°C	5003 ± 0.99	3159 ± 22.12	6.96 ± 0.11	20.50 ± 2.63
Resina 50°C	4745 ± 32.48	3513 ± 44.26	5.52 ± 0.76	12.74 ± 4.62
Resina 70°C	4856 ± 18.64	4829 ± 18.51	5.42 ± 0.53	5.56 ± 0.57
Alumínio 30°C	5026 ± 0.61	2262 ± 9.29	6.89 ± 0.12	46.01 ± 1.72
Alumínio 50°C	5085 ± 0.82	4211 ± 47.45	6.79 ± 0.08	13.96 ± 6.13
Alumínio 70°C	5204 ± 1.13	3006 ± 38.85	6.74 ± 0.07	23.35 ± 7.15
Zamak 30°C	5206 ± 1.60	2937 ± 44.08	7.29 ± 0.10	30.89 ± 8.89
Zamak 50°C	5288 ± 1.96	4666 ± 61.18	7.17 ± 0.24	14.49 ± 7.20
Zamak 70°C	5452 ± 1.30	3847 ± 48.92	7.65 ± 0.04	13.81 ± 3.94

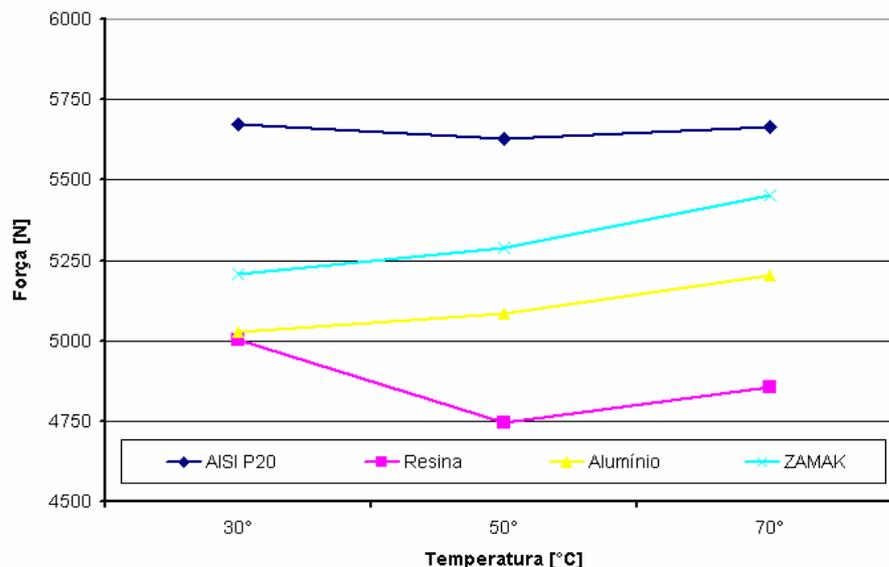


Figura 37- Comparativo entre as configurações no ensaio de resistência à tração

As propriedades de resistência à tração de um polímero semicristalino (PP) são altamente dependentes do grau de cristalinidade, bem como do tamanho dos esferulitos e sua distribuição. Isso fica mais evidente quando se relaciona os dados da Tabela 14 com o grau de cristalinidade (Tabela 13) e com as micrografias das amostras estudadas. Para validar essa afirmação, e as conclusões que a seguir serão relatadas sobre o ensaio de resistência ao impacto, o item 4.5.3 apresentará um comparativo entre essas análises.

4.5.2 Ensaio de resistência ao impacto

Os resultados obtidos no ensaio de resistência ao impacto são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de resistência ao impacto

<i>Configuração</i>	<i>Resistência ao impacto [J/m]</i>	<i>Energia Absorvida</i>
AISI P20 30 / 41°C	34.27 ± 1.84	4.68 ± 0.12
AISI P20 30 / 41°C (linha de solda)	31.19 ± 4.28	4.36 ± 0.77
AISI P20 50 / 53°C	30.49 ± 2.27	4.35 ± 0.25
AISI P20 50 / 53°C (linha de solda)	29.40 ± 3.61	4.20 ± 0.47
AISI P20 70°C	39.05 ± 6.12	5.08 ± 0.73
AISI P20 70°C (linha de solda)	32.79 ± 1.78	4.48 ± 0.29
Resina 30°C	71.45 ± 6.22	7.56 ± 0.75
Resina 30°C (linha de solda)	45.58 ± 11.76	6.60 ± 0.30

Resina 50°C	59.63 ± 11.44	7.25 ± 1.56
Resina 50°C (linha de solda)	49.81 ± 12.88	6.93 ± 2.83
Resina 70°C	57.35 ± 9.56	6.45 ± 1.02
Resina 70°C (linha de solda)	63.37 ± 1.40	6.40 ± 0.19
Alumínio 30°C	39.94 ± 1.92	5.32 ± 0.26
Alumínio 30°C (linha de solda)	35.97 ± 2.49	5.00 ± 0.31
Alumínio 50°C	37.59 ± 2.88	4.84 ± 0.44
Alumínio 50°C (linha de solda)	33.87 ± 1.11	4.40 ± 0.05
Alumínio 70°C	39.97 ± 3.13	5.24 ± 0.15
Alumínio 70°C (linha de solda)	30.82 ± 0.82	4.30 ± 0.10
Zamak 30°C	42.44 ± 2.59	5.04 ± 0.23
Zamak 30°C (linha de solda)	(a) 44.92 ± 2.58	5.00 ± 0.27 (b)
Zamak 50°C	48.16 ± 3.61	5.60 ± 0.96
Zamak 50°C (linha de solda)	45.13 ± 4.56	4.83 ± 0.54
Zamak 70°C	42.85 ± 4.75	5.06 ± 0.30
Zamak 70°C (linha de solda)	44.66 ± 3.93	5.08 ± 0.37

A partir dos resultados visualizados nessa tabela, observa-se que há uma redução no valor de resistência ao impacto de cerca de 7%, em média nas amostras ensaiadas sobre a linha de solda, em relação às amostras obtidas sobre a região de entrada da massa fundida no molde. Essa diferença foi maior nas amostras injetadas sobre o macho de Alumínio (~11%), seguidas pelas amostras injetadas sobre o aço AISI P20 (~7%), Resina (~6%) e, Zamak (~5%). Essa redução na resistência ao impacto já era esperada, pois linhas de solda agem como concentradoras de tensão, causando um enfraquecimento mecânico na peça injetada. Um comparativo do comportamento apresentado pelas diferentes configurações estudadas, quanto à resistência ao impacto, pode ser visualizado nos gráficos da Figura 38.

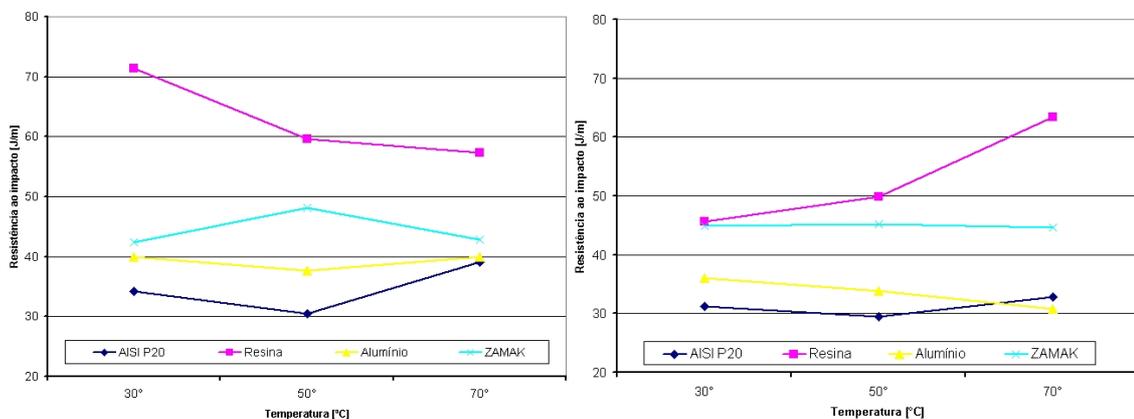


Figura 38- Comparativo entre as configurações no ensaio de resistência ao impacto: (a) região sem linha de solda; (b) região com linha de solda

Assim como no estudo de resistência à tração, os resultados do ensaio de resistência ao impacto também foram analisados sob o ponto de vista comparativo entre as amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20 e as demais amostras das outras configurações. Observa-se que houve uma redução na resistência ao impacto suportada pelas amostras das configurações de Resina, Alumínio e Zamak. Essa redução pode ser observada na Tabela 16, a seguir.

Tabela 16 - Redução, em relação às amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20, da resistência ao impacto

<i>Amostra</i>	<i>Sobre a frente de fluxo</i>	<i>Sobre a linha de solda</i>
Resina	50.7%	59.4%
Alumínio	9.1%	20.4%
Zamak	11.3%	14.3%

Essa redução na resistência ao impacto não se justifica quando se analisa o fator grau de cristalinidade de forma isolada, pois peças com graus de cristalinidade maiores apresentam piores índices de resistência ao impacto. Mas, essa redução pode ser explicada quando analisada a morfologia dessas peças, como por exemplo, a forma, tamanho e orientação do esferulito.

Quanto ao tamanho dos esferulitos, pode-se concluir que as amostras que apresentaram esferulitos de tamanho grande, apresentaram uma resistência ao impacto inferior. Esse é o caso, principalmente das amostras injetadas sobre o macho de Resina. Esse comportamento, também pode ser observado nas amostras injetadas sobre os machos de Alumínio e Zamak, que apresentaram um tamanho de esferulito um pouco maiores que as amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20.

4.5.3 Considerações sobre a morfologia e cristalinidade com as propriedades mecânicas

Através dos dados apresentados nos itens anteriores, sobre os ensaios de resistência mecânica, pode-se observar que as amostras injetadas sobre o macho de Resina apresentaram um comportamento inferior as amostras injetadas sobre os machos metálicos. Isso se dá, principalmente, pelo fato de que o ciclo de injeção para essas amostras, precisou ser prolongado para que as amostras pudessem ser extraídas do molde devido à característica de isolante térmico dessa resina epoxídica, Como visto anteriormente, o resfriamento lento gera esferulitos de tamanho grande, e nesse caso, existe ao final da cristalização do polímero, uma menor quantidade de moléculas interesferulíticas, isto é, moléculas que cruzam entre os esferulitos criando uma interface. Isso faz com que haja uma diminuição da capacidade da massa polimérica (peça plástica) em absorver a propagação de trincas oriundas do ensaio de resistência ao impacto.

Quanto ao ensaio de resistência à tração, as amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20 apresentaram um melhor comportamento, pois analisando conjuntamente a morfologia dessas amostras (ver Figura 33), percebe-se que há um melhor refinamento da estrutura, além de uma melhor disposição. Além disso, essas amostras apresentaram um maior grau de cristalinidade, em relação às amostras injetadas sobre os outros materiais.

Comparando a morfologia e grau de cristalinidade das amostras injetadas sobre os machos de Alumínio e Zamak, com as amostras injetadas sobre o aço AISI P20 e Resina, percebe-se que as propriedades mecânicas apresentadas nas amostras injetadas sobre o Alumínio e o Zamak validam o que foi concluído para as amostras injetadas sobre os machos de aço AISI P20 e de Resina. Nessas amostras (Zamak e Alumínio), pode-se observar um tamanho de esferulito superior ao apresentado nas amostras injetadas sobre o aço AISI P20 e inferior ao apresentado nas amostras injetadas sobre o macho de Resina. Quanto à cristalinidade, os valores apresentados foram, na maioria das configurações de Alumínio e

Zamak, intermediários aos valores das amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20 e Resina. Esses dois aspectos aliados garantiram que as amostras injetadas sobre esses dois machos (Zamak e Alumínio) apresentassem um comportamento mecânico intermediário, se comparados com as amostras injetadas sobre os machos de aço AISI P20 e Resina.

4.6 Análises Dimensionais

O percentual de contração de uma peça de plástico está diretamente relacionado à temperatura, tanto do molde como da massa polimérica fundida, bem como o valor característico de contração que cada polímero apresenta. Quanto maior a temperatura do molde, maior o grau de contração [10]. Como nesse trabalho a temperatura da massa fundida e o polímero analisado (polipropileno) foram mantidos constantes para todas as configurações analisadas, esse percentual será analisado sob o ponto de vista da temperatura do molde. A pressão de recalque também é um fator importante nesse tipo de análise, além da influência das propriedades térmicas dos materiais das cavidades, principalmente o coeficiente de condutividade térmica.

Para polímeros semicristalinos, como é o caso do polímero usado nesse trabalho (PP), a contração considerada ideal está na faixa de 1 a 2,5%. Buscar reduzir esses valores, através de modificações nos parâmetros de injeção, pode gerar peças com baixas propriedades mecânicas [10, 76].

Nesse trabalho, o tempo de recalque para as configurações que envolvem o macho em Resina foi aumentado, e a pressão de recalque para essas configurações foi reduzida em 40% em relação à pressão de injeção⁷. Essas alterações se fizeram necessárias para manter a integridade do componente macho em Resina, gerando assim, diferença no dimensional das peças injetadas sobre esse material, em relação às configurações de outros materiais, como

⁷ A pressão de injeção usada nas configurações de Resina foi reduzida em 20%, em relação às pressões simuladas para os materiais metálicos envolvidos nesse trabalho.

pode ser visto a seguir na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo das dimensões

Configuração	Altura (60mm)	Dia.Sup. (60mm)	Dia.Inf. (63mm)	Espessura (1.50mm)
AISI P20 30 / 41°C	58.58 ±0.02	59.34 ±0.05	62.40 ±0.06	1.46 ±0.01
AISI P20 50 / 53°C	58.49 ±0.03	59.29 ±0.01	62.15 ±0.05	1.44 ±0.01
AISI P20 70°C	58.39 ±0.05	59.19 ±0.02	62.09 ±0.02	1.44 ±0.01
Resina 30°C	58.64 ±0.03	58.85 ±0.08	62.07 ±0.04	1.49 ±0.01
Resina 50°C	58.72 ±0.02	58.80 ±0.07	62.23 ±0.04	1.48 ±0.01
Resina 70°C	58.87 ±0.03	59.12 ±0.04	62.37 ±0.03	1.47 ±0.01
Al 30°C	58.64 ±0.01	59.27 ±0.02	62.38 ±0.07	1.45 ±0.01
Al 50°C	58.59 ±0.02	59.21 ±0.02	62.34 ±0.03	1.44 ±0.01
Al 70°C	58.45 ±0.03	59.15 ±0.01	62.49 ±0.11	1.42 ±0.01
Zamak5 30°C	58.74 ±0.03	59.29 ±0.01	62.48 ±0.03	1.45 ±0.01
Zamak5 50°C	58.63 ±0.02	59.21 ±0.07	62.53 ±0.04	1.44 ±0.01
Zamak5 70°C	58.35 ±0.03	59.12 ±0.04	62.39 ±0.03	1.43 ±0.01

Nas próximas Figuras (39, 40, 41 e 42) pode-se observar o percentual de contração verificado nas amostras das configurações estudadas nesse trabalho. O percentual de contração foi calculado comparando a medida nominal da peça projetada com a média apresentada na tabela acima. Nessas figuras, o eixo das abscissas apresenta o valor da contração apresentada e, no eixo das ordenadas encontram-se os materiais utilizados nos insertos macho desse trabalho. Uma legenda foi criada para distinção de cada temperatura analisada em cada material das insertos macho. No Anexo 2, encontram-se para consulta, todas as medidas realizadas para a obtenção desses valores.

Na dimensão da altura da peça (Figura 39), as configurações a 70°C com machos de materiais metálicos (AISI P20, Alumínio e Zamak) apresentaram contração acima do máximo estipulado pela teoria para esse tipo de polímero, que é de 2,5%. Já as amostras injetadas sobre o macho de Resina apresentaram contração dentro desse valor aceitável (entre 1 e 2,5%) já que para essas configurações um maior tempo de recalque foi aplicado. Ao contrário do que foi visto anteriormente, no início desse item, sobre a relação entre a temperatura do molde e o grau de contração, as amostras das configurações em Resina apresentaram comportamento contrário ao esperado, sendo que a configuração de 70°C apresentou um menor valor de

contração, seguida da configuração de 50°C e por último a de 30°C, que apresentou um valor maior de contração.

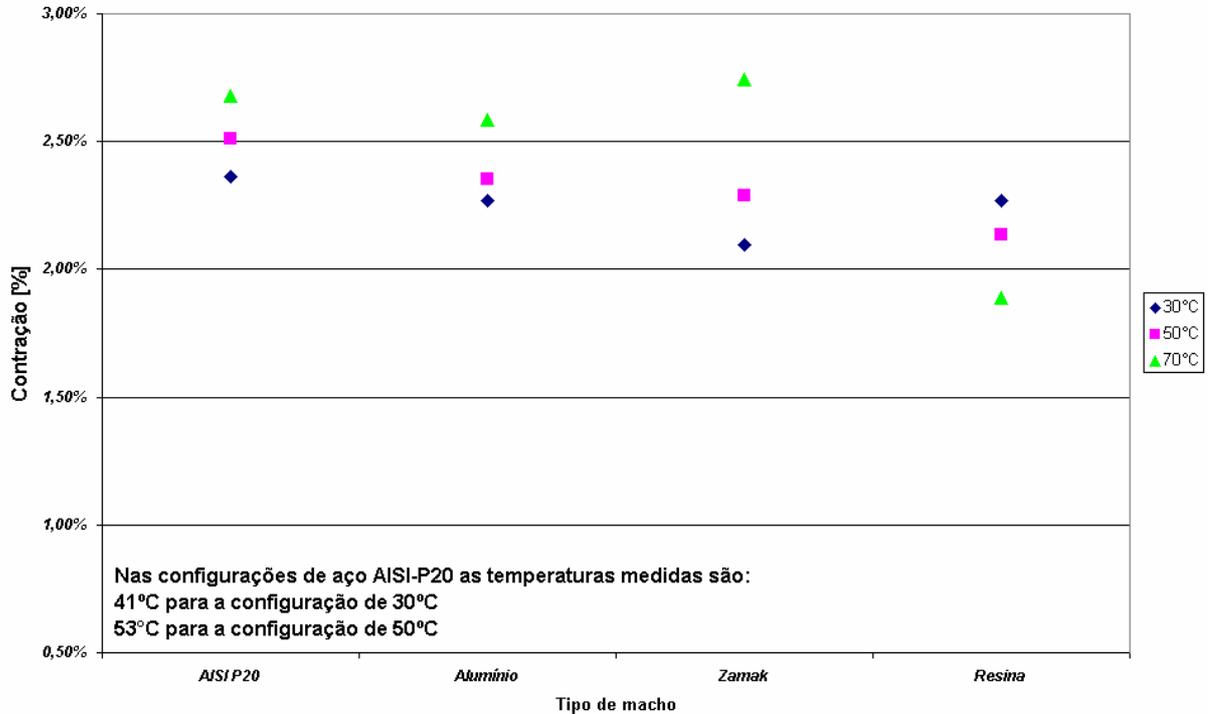


Figura 39 - Percentual de contração na medida da altura da peça

Para o diâmetro de 60mm (Figura 40) todas as amostras apresentaram valores de contração dentro do esperado para esse tipo de polímero. A maioria dos valores de contração apresentados ficaram entre 1% e 1,5%, com a exceção das amostras medidas das configurações de 30°C e 50°C injetadas sobre o macho de Resina. Analisando a contração sobre o ponto de vista de temperatura do molde, apenas as amostras injetadas sobre o macho de Resina apresentaram um comportamento contrário ao citado pela teoria.

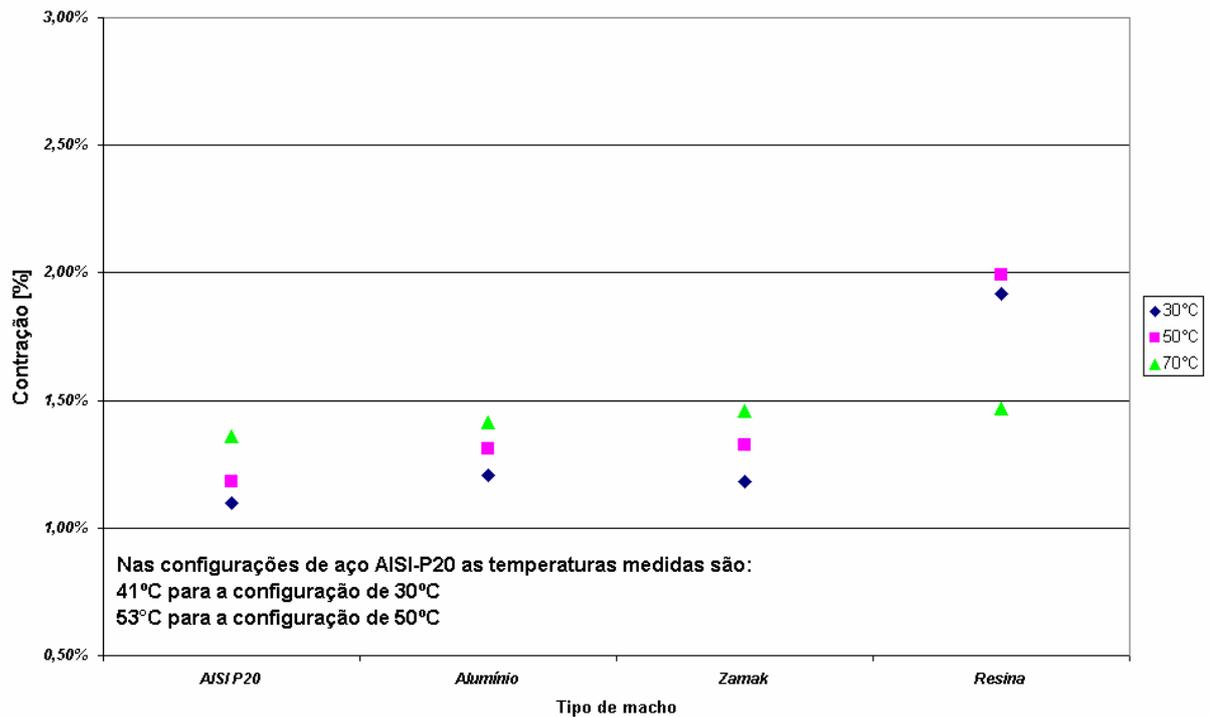


Figura 40 - Percentual de contração na medida do diâmetro de 60mm

Quanto aos valores de contração para o *diâmetro de 63mm* (Figura 41), todas as amostras apresentaram um valor dentro do esperado para esse tipo de polímero (entre 0,5% a 1,5%). Quanto a influência da temperatura do molde na contração, apenas as amostras injetadas sobre o macho de AISI P20 apresentaram um comportamento esperado, em relação ao citado na literatura. Observa-se também, que nessa dimensão avaliada, os valores percentuais de contração entre as configurações estudadas ficaram bem próximos.

Em relação à dimensão de espessura da peça, exceto as configurações de Resina, todas as amostras apresentaram um valor excessivo de contração, como pode ser visualizado na Figura 42, a seguir. Isso se deu pelo fato das amostras de Resina terem sido injetadas com valores diferenciados de pressão de injeção, pressão de recalque, tempo de injeção, tempo de recalque e velocidade de injeção. Como as pressões e velocidade de injeção foram reduzidas e, para que a peça fosse obtida completa, os tempos de injeção e recalque foram aumentados. Isso fez com que a peça fosse preenchida de maneira mais eficiente.

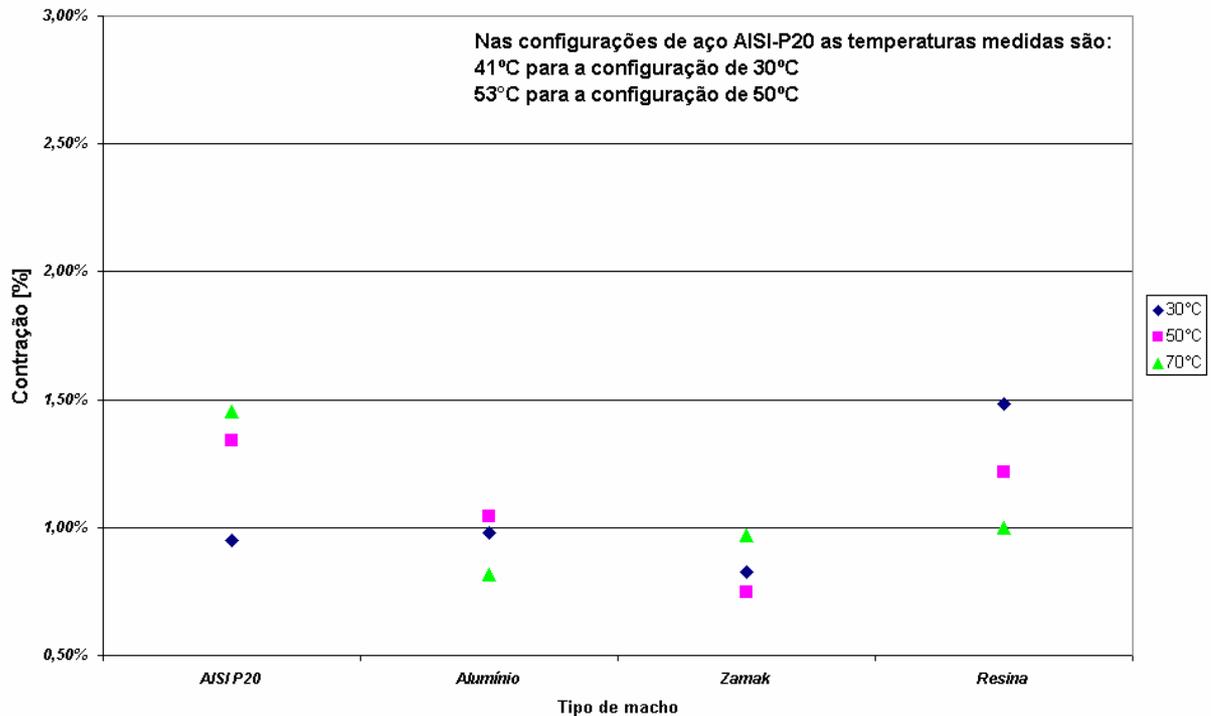


Figura 41 - Percentual de contração na medida do diâmetro de 63mm

Outro ponto relevante para ser discutido na análise dessa dimensão, é o fato de que como o molde foi projetado para facilitar as trocas de cavidades diretamente na máquina injetora, o alinhamento dessas cavidades se torna dificultoso. Na troca dos insertos, o alinhamento foi prejudicado, gerando peças injetadas com paredes de diferentes espessuras. Isso também afetou as medidas do diâmetro de 63mm. No Anexo 2, encontram-se para consulta, as planilhas com todos os valores medidos das amostras, e também, um desenho esquemático que mapeia na amostra onde essas medidas foram tomadas. Como as medidas foram sempre tomadas de forma simétrica e na mesma região, para todas as amostras, essas diferenças podem ser desprezadas, pois os resultados aqui apresentados são uma média aritmética desses valores.

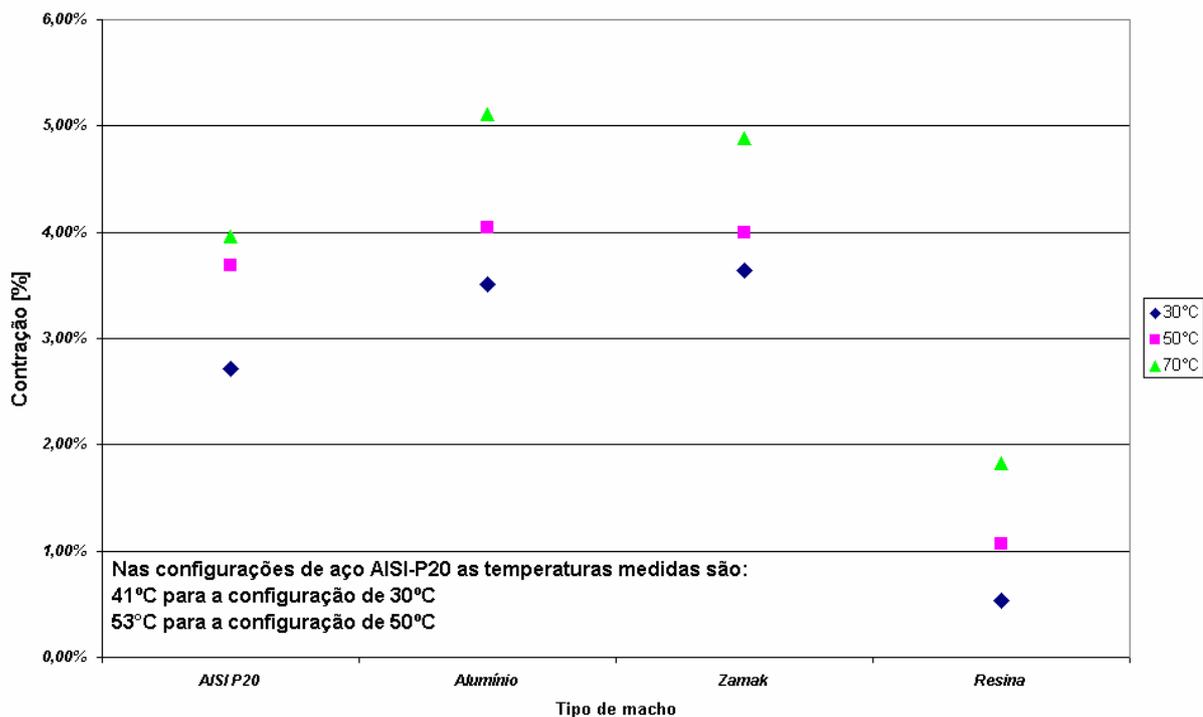


Figura 42 - Percentual de contração na medida da espessura

4.7 Aspectos Visuais

Analisando os dados da Tabela 18, quanto aos resultados de rugosidade nas peças e nos insertos macho, percebe-se que a temperatura do molde afeta o acabamento da peça de forma abrangente. Associado a isso, também é preciso analisar a taxa de resfriamento da peça. Quanto mais lento o resfriamento, o brilho da peça injetada é mais elevado, pois a massa fundida pode copiar bem as irregularidades das cavidades [10]. Sob o ponto de vista de tempo de resfriamento observa-se que as amostras injetadas sobre os machos com temperaturas maiores (50°C e 70°C) apresentaram valores mais baixos de rugosidade, por possuírem maiores tempos de resfriamento (5s a mais que os ciclos a 30°C⁸).

Quanto às linhas de soldas, quanto menor o gradiente de temperatura no processo (temperatura do molde mais perto da temperatura do fundido) mais uniforme será a linha de solda, existindo pouca ou nenhuma anisotropia estrutural.

⁸ Exceto para as configurações de Resina que o tempo de ciclo foi de 120s para todas as temperaturas.

Tabela 18 - Aspectos visuais das peças obtidas

<i>Macho</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Rugosidade da peça</i> <i>Ry [μm]</i>	<i>Rebarba</i>	<i>Linha de solda</i>	<i>Preenchimento</i>
AISI P20	30 / 41°C	9.00 ±0.58	Sim	Não	Ok
Ry=5.00	50 / 53°C	7.33 ±0.33	Sim	Não	Ok
±0.58μm	70°C	6.67 ±0.67	Não	Não	Ok
Resina	30°C	16.00 ±3.84	Sim	Sim	Ok
Ry=12.33	50°C	12.67 ±1.20	Sim	Sim	Ok
±0.67 μm	70°C	14.33 ±2.96	Não	Não	Ok
Alumínio	30°C	6.00 ±1.47	Não	Sim	Rechupe
Ry=4.67	50°C	6.00 ± 0.58	Não	Não	Ok
±0.33μm	70°C	4.67 ±0.33	Não	Não	Rechupe
Zamak5	30°C	6.00 ±0.58	Não	Sim	Ok
Ry=7.00	50°C	5.67 ±0.67	Não	Não	Rechupe
±0.58μm	70°C	4.67 ±0.33	Não	Não	Incompleto

Nas configurações de aço AISI P20 e de Resina ocorreram rebarbas nas peças (Tabela 18). Esse fato ocorreu devido ao molde ter sido projetado e confeccionado para operar a uma temperatura estabilizada de 60°C a 70°C e com suas cavidades de AISI P20. Na injeção das primeiras configurações (AISI P20 de 30°C e 50°C) observou-se uma folga entre o macho e seu alojamento na placa extratora. Essa folga ocasionou rebarbas nas peças produzidas nestas configurações. Na Figura 43 as rebarbas ocorridas nas configurações AISI P20 30/41°C e 50/53°C podem ser visualizadas.

Na injeção das amostras da configuração AISI P20 de 70°C essas rebarbas não foram observadas, pois devido à dilatação térmica do aço AISI P20 essas folgas foram eliminadas.

Na injeção das amostras sobre os machos de Alumínio e Zamak, que possuem coeficientes de expansão térmica superiores a do aço (ver Tabela 5) não houve rebarbas. Na configuração de Zamak a 70°C, a dilatação térmica foi excessiva ao ponto de todos os escapes de gases na placa extratora terem sido fechados causando peças incompletas e até emperramento do molde (Figura 44). Para o macho de Alumínio, que também apresenta um valor alto de coeficiente de dilatação térmica, na temperatura de 70°C não ocorreu emperramento do molde, pois como o módulo de elasticidade desse material é inferior ao do

Zamak houve esmagamento do macho na região do fechamento. Esse esmagamento gerou um pequeno escape de gases, o que não afetou a qualidade da peça produzida.

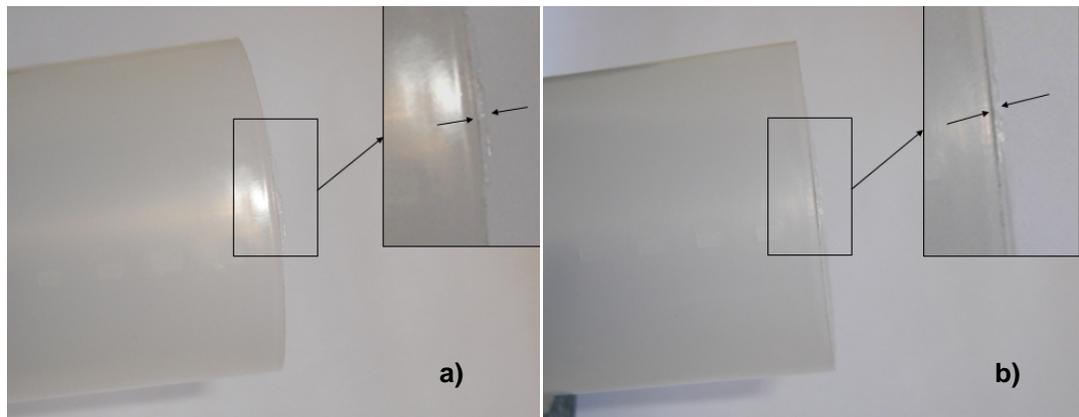


Figura 43 - Rebarbas nas peças injetadas sobre o macho de AISI P20: (a) 30°C e (b) 50°C



Figura 44 - Falha no preenchimento da peça

Quanto às configurações injetadas sobre o macho de Resina a 30°C e 50°C, as rebarbas ocorreram devido à imperfeição da geometria do macho que foi fundido. Na temperatura de 70°C não ocorreu rebarbas devido à dilatação térmica do material. Na Figura 45 as rebarbas ocorridas nessas peças podem ser visualizadas. Observa-se que na Figura 45-b, na amostra injetada sobre o macho de Resina a 50°C, a rebarba é menor em comparação a Figura 45-a (amostra da configuração Resina 30°C) devido a maior dilatação térmica do componente que fez com que folga fosse reduzida.

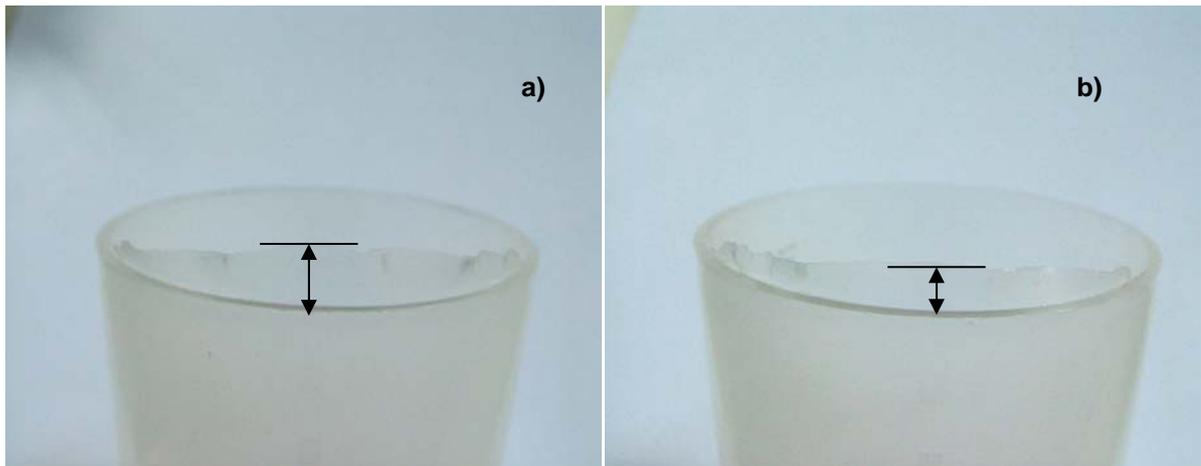


Figura 45 - Rebarbas nas peças injetadas sobre o macho de Resina: (a) 30°C e (b) 50°C

4.8 Desgaste do ferramental e contaminação por metais

4.8.1 Análise de contaminação através de RBS

Através de análise química RBS, detectou-se a influência de cada material utilizado nos machos na superfície da peça injetada, sob o ponto de vista de contaminação por componentes metálicos. Também, através desse estudo pode se observar o desgaste do ferramental, avaliando o quanto que cada cavidade perde de massa por peça injetada, o que será melhor esclarecido no próximo subitem.

Para um melhor entendimento dos espectros resultantes dessas análises de RBS, na Tabela 19, encontra-se a quantidade de energia medida para cada elemento químico. Nos espectros, que são apresentados a seguir, esses valores de energia, juntamente com o elemento químico associado são ilustrados.

Tabela 19 - Quantidade de energia medida para cada elemento na análise de RBS

<i>Elemento</i>	<i>Energia [keV]</i>	<i>Elemento</i>	<i>Energia [keV]</i>
C	511	Cu	1560
Mn	1501	Fe	1508
Si	1137	Pb	1853
Cr	1476	Cd	1738
Mo	1697	Sn	1751
Al	1111	Ni	1528
Mg	1040	Zn	1571

Nas Figuras a seguir (46, 47, 48 e 49), os espectros resultantes dos ensaios de RBS são ilustrados e, posteriormente discutidos. Observa-se que no eixo das abscissas encontram-se as contagens de cada elemento químico, e no eixo das ordenadas, o valor de energia, dado em keV.

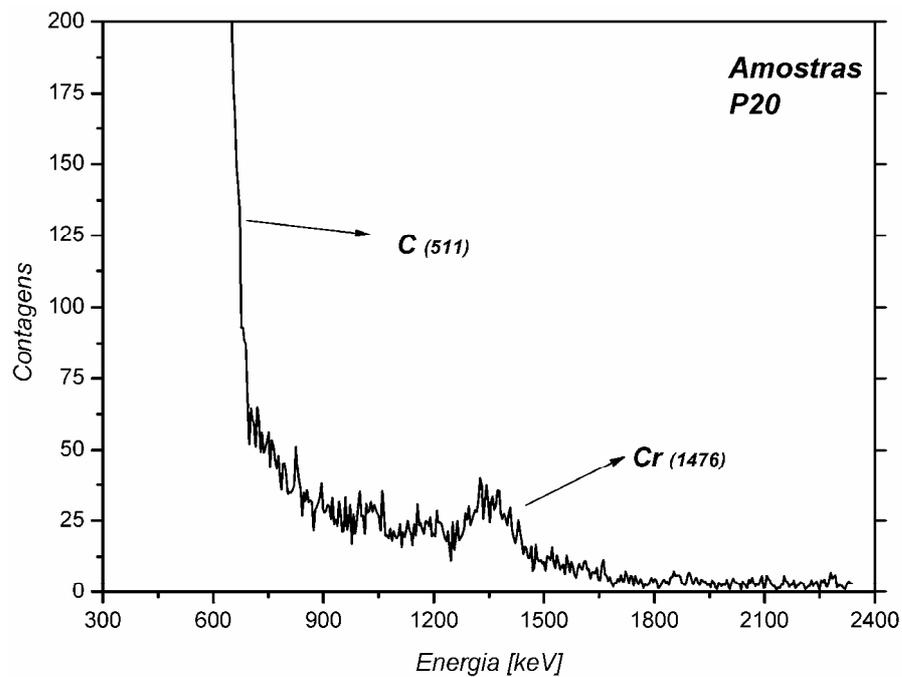


Figura 46 – Espectro obtido por RBS, configuração AISI P20

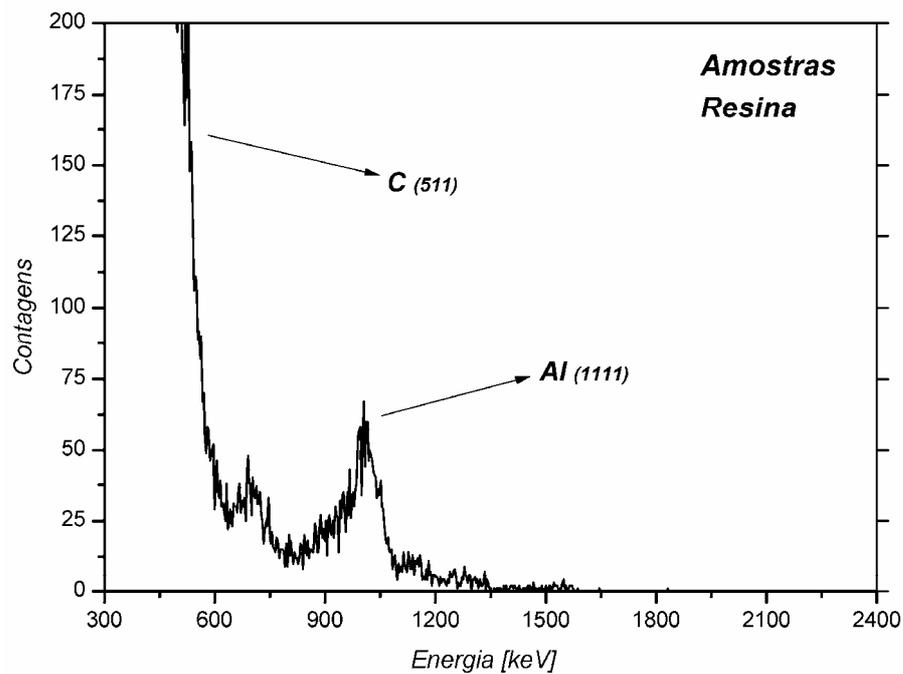


Figura 47 – Espectro obtido por RBS, configuração Resina

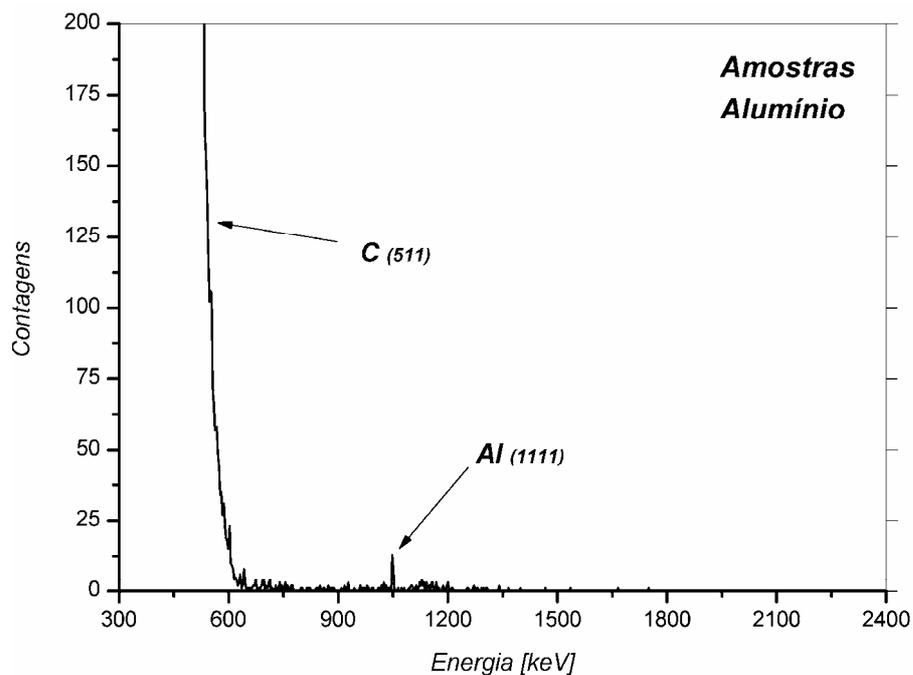


Figura 48 – Espectro obtido por RBS, configuração Alumínio

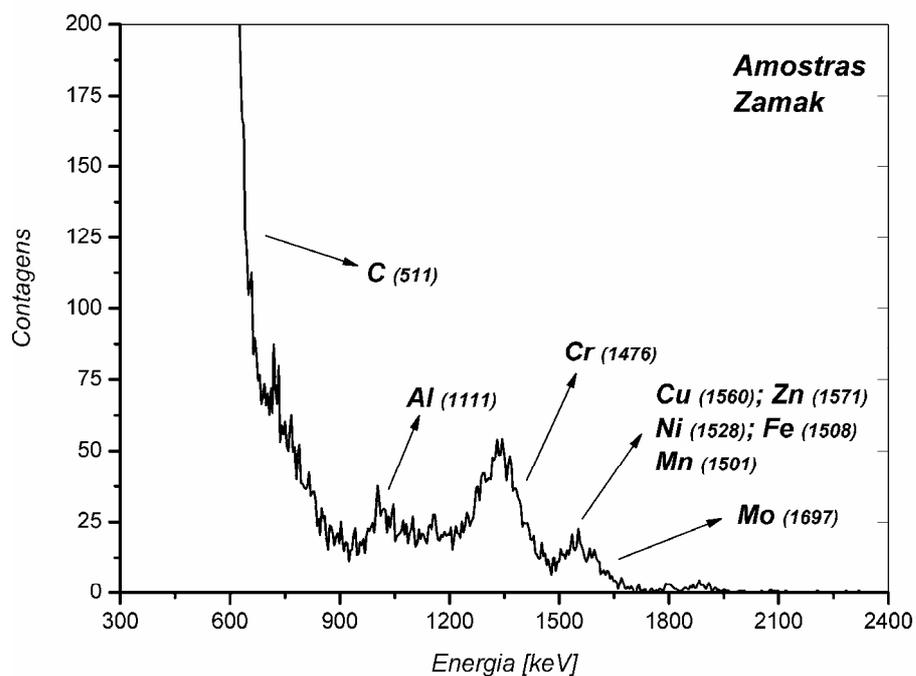


Figura 49 – Espectro obtido por RBS, configuração de Zamak

Observa-se que as peças injetadas sobre o macho de AISI P20 apresentaram a incorporação de cromo. Nas peças injetadas sobre o macho de Zamak e nas peças injetadas sobre o macho de Resina pode-se observar uma contagem significativa de alumínio na superfície. Além de alumínio, as peças injetadas sobre o macho de Zamak, também,

incorporaram uma contagem significativa de cromo e, em menores contagens: ferro, cobre, zinco, níquel, manganês e molibdênio. Já, nas peças injetadas sobre as configurações de Alumínio observa-se uma pequena contagem de alumínio.

4.8.2 Desgaste do ferramental

Como visto anteriormente, o tamanho dos lotes produzidos por ferramental rápido é ponto crítico para a escolha do processo e do material a ser utilizado na obtenção dos protótipos. Para que uma avaliação de desgaste de ferramental fosse melhor estudada, seria necessário disponibilizar um grande investimento de matéria-prima e de tempo, visto que para alguns materiais aplicados nesse trabalho se espera lotes de 500 mil a 1 milhão de peças (aço AISI P20). Além disso, seria necessário um estudo dimensional apurado com instrumentos de medição de alta resolução, já que são esperados valores diminutos nesse tipo de medida.

Nesse trabalho, somente o desgaste e a integridade da cavidade de Resina foram apurados, e mesmo assim, através de inspeção visual.

Para a durabilidade do macho de Resina, estipularam-se os parâmetros adotados para a configuração de 50°C e injetou-se 200 amostras. Após foi realizada uma avaliação do macho e das amostras que não apresentou nenhuma alteração significativa na superfície e dimensional. Como não houve nenhuma variação nas amostras e no macho, preferiu-se realizar um ensaio de resistência com condições de processamento normais para um inserto macho de material metálico. Para esse ensaio adotaram-se os valores simulados para a configuração de 50°C para o aço AISI P20, com exceção do tempo de ciclo que foi mantido constante (120s). Com isso, puderam ser realizadas conclusões mais verdadeiras sobre os cuidados necessários com os parâmetros de processo para Ferramental Rápido utilizando resinas epoxídicas, além do desgaste que esse tipo de material pode sofrer durante esse tipo de uso.

Nessas condições de processo, somente 35 peças conseguiram ser injetadas. Já no

início dessa amostragem (10º ciclo), um ramo do canal de injeção rompeu e, logo em seguida (13º ciclo), a borda superior do macho apresentou um lascamento. Na amostra de número 35 desse ensaio, a superfície lateral do macho começou a se degradar. Preferiu-se encerrar o ensaio nesse momento, pois essas imperfeições na superfície do macho comprometem a qualidade visual da peça injetada. Nas próximas Figuras (50 e 51), essas imperfeições podem ser visualizadas.

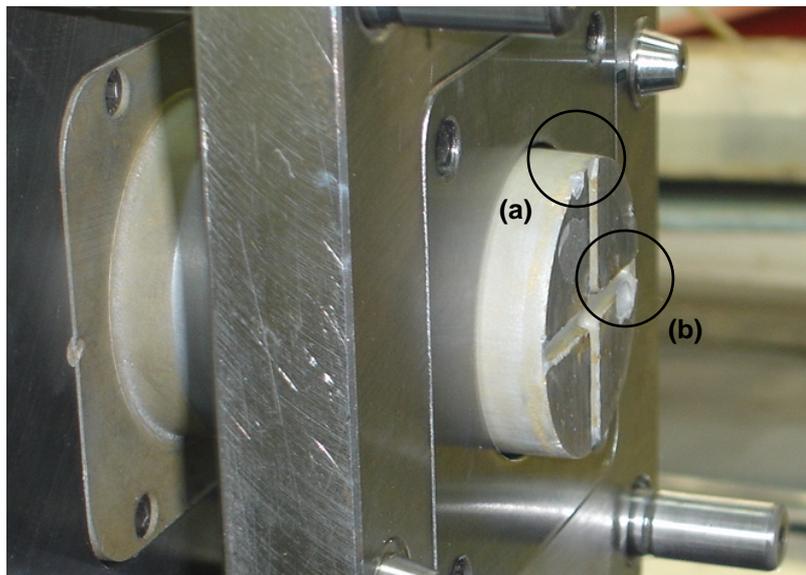


Figura 50 - Lascamento da borda (a) e da região que molda o galho (b)



Figura 51 - Degradação da superfície do macho de Resina

No total, foram injetadas com esse inserto macho 325 peças, sendo 200 peças no ensaio de durabilidade na configuração Resina 50°C e 35 peças com os parâmetros da

configuração AISI P20 50°C, além de 90 peças para as configurações de Resina a 30°C e 70°C. As amostras para a configuração Resina 50°C foram coletadas do ensaio de durabilidade.

4.9 Estudo dos custos de fabricação dos insertos e do uso de Ferramental Rápido

Em relação à viabilidade econômica para obtenção de Ferramental Rápido, basicamente dois aspectos principais foram comparados no decorrer desse trabalho: custo da matéria-prima e custo da hora de usinagem. Na Tabela 20 a seguir, observa-se uma redução significativa no tempo, e conseqüentemente no custo final dos elementos moldantes, como por exemplo, uma redução de 45% no tempo de fabricação e de 69% no custo final (usando-se resina epoxídica ao invés de aço AISI-P20).

Tabela 20 - Custos e tempo de produção

	<i>Matéria-prima [US\$]</i>	<i>CNC [h]</i>	<i>Tempo Total [h]</i>	<i>Total [US\$]</i>
AISI P20	92.52	9.75	10	312.52
Resina	24.10	2.5	4.5+10*	97.60
Alumínio	35.43	6.75	7	194.93
Zamak	52.44	7.25	7.5	222.94

* tempo de cura.

Os resultados apresentados nessa tabela demonstram o interesse econômico do uso de materiais alternativos na construção de moldes de injeção. Ressalta-se que o tempo de cura não foi acrescentado aos custos, por achar-se que esse valor não represente um custo significativo. Além disso, deve ser acrescido aos valores acima o custo total do molde de injeção (projeto, porta molde, fabricação e ajuste) que para esse projeto ficou em torno de U\$3200.00.

4.10 Considerações Finais

As informações apresentadas nesse capítulo, aliadas com os conceitos apresentados no Capítulo 2 e com o experimento desenvolvido e relatado no Capítulo 3 servirão de base para

que as conclusões sobre esse trabalho possam ser tomadas e apresentadas no Capítulo 5 a seguir.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Introdução

Este capítulo encerra esse trabalho apresentando as conclusões obtidas por essa pesquisa e perspectivas para futuros trabalhos.

A utilização de materiais não convencionais, ou como aqui chamados “alternativos”, nas cavidades moldantes de uma ferramenta de injeção, é uma questão que não pode ser encarada como uma simples atividade. Vários fatores de processo e morfológicos se inter-relacionam gerando vantagens e desvantagens que devem ser muito bem analisadas pelo responsável pela seleção desses materiais. Por isso, esse profissional deve saber muito bem qual será a aplicação que a peça polimérica terá, e quais as suas solicitações mecânicas e/ou químicas.

Durante a fase de estudo para esse projeto, observou-se que grande parte das bibliografias consultadas apresenta o tamanho do lote como o principal parâmetro a ser analisado na escolha do material a ser usado nas cavidades moldantes de moldes híbridos de injeção. Além desse parâmetro, pode-se citar também, que muitas das literaturas técnicas disponíveis sobre esse assunto, somente abordam qual o melhor processo de Prototipagem Rápida deve ser usado, e para qual técnica de Ferramental Rápido esse processo tem melhores resultados.

Nesse sentido, esse trabalho pode ser considerado como uma contribuição nessa área de pesquisa, analisando e relacionando os diferentes parâmetros de processo e propriedades de materiais que influenciam nas propriedades finais desejadas em componentes plásticos injetados com esse tipo de técnica, baseadas em Moldes Híbridos.

5.2 Conclusões

Este trabalho avaliou o uso de materiais alternativos no uso de Moldes Híbridos. Essa avaliação, principalmente, foi feita de modo a estudar a influência desses materiais nas características finais do produto injetado. Dessa forma, essas características observadas, juntamente com as conclusões obtidas serão relatadas nos próximos dois subitens. Primeiramente serão abordadas as conclusões gerais sobre o estudo dessa pesquisa e, por último, as conclusões específicas obtidas através das análises dos experimentos realizados serão relatadas.

5.2.1 Conclusões gerais

- O uso de moldes híbridos torna-se viável para a obtenção de lotes de protótipos. Dependendo do tamanho do lote a ser produzido e da aplicação que esses protótipos terão, a seleção do material das cavidades moldantes deve ser realizada observando-se as solicitações mecânicas e químicas que o protótipo sofrerá na sua vida útil.
- O projeto do molde desenvolvido para esse trabalho apresentou-se viável e confiável. A agilidade apresentada no conceito de intercambialidade garantiu o uso das cavidades, de diferentes materiais estudadas nesse trabalho. Além disso, a instrumentação do molde com termopares, garantiu que o estudo térmico realizado pudesse apresentar informações precisas sobre as amplitudes térmicas. Devido a flexibilidade do conceito do molde, o mesmo já pode ser usado em outros trabalhos, como o da referência [72].
- A utilização do modelo computacional apresentou significativa ajuda para a determinação dos parâmetros usados no experimento com as cavidades de diferentes materiais.
- As técnicas e ensaios utilizados nesse trabalho foram eficazes para a caracterização das peças protótipos.

5.2.2 Conclusões específicas

- Quanto à análise térmica realizada, através das amplitudes de temperaturas medidas nos ensaios, as diferenças nas propriedades físicas dos materiais, principalmente a condutividade térmica, podem ser observadas (item 4.2). Além disso, a análise do número de *Biot* para os diferentes materiais mostrou-se uma boa ferramenta para a caracterização térmica dos materiais dos insertos macho estudados.
- Outro parâmetro térmico que deve ser bem analisado na questão seleção de materiais para moldes híbridos é o coeficiente de dilatação linear do material. Todas as cavidades foram manufaturadas através do mesmo modelo em CAD, por isso apresentaram as mesmas dimensões finais. Problemas operacionais, principalmente na configuração de Zamak 70°C, ocorreram, pois o coeficiente de dilatação térmica do Zamak é maior que o dos outros materiais (Tabela 5 do Capítulo 2). Devido a isso, ocorreu uma dilatação excessiva do inserto macho o que acabou gerando um fechamento nos escapes de gases o que ocasionou peças incompletas e travamento no molde de injeção. Por outro lado, na configuração de Resina 70°C isso foi benéfico, pois a dilatação excessiva acabou eliminando as folgas que geravam rebarbas.
- Foi determinado através dos resultados do ensaio de DSC (item 4.4), o grau de cristalinidade do polímero estudado, o polipropileno. Observou-se que a temperatura da superfície das cavidades (temperatura do molde) foi um fator importante na variação dos valores encontrados. Conforme esperado, nas configurações a 30°C o grau de cristalinidade medido foi menor devido ao menor tempo de resfriamento. Para as outras configurações de 50°C e 70°C, observa-se um valor semelhante para o grau de cristalinidade. Na configuração de Resina 30°C, essa variação diminuiu, pois o ciclo de injeção é o mesmo (120s) para as três temperaturas usadas para esse material. Juntamente com as análises que serão concluídas no próximo tópico, sobre a morfologia cristalina, o

grau de cristalinidade medido está diretamente relacionado com a resistência mecânica das peças.

- Através das análises realizadas nas micrografias apresentadas nesse trabalho (item 4.3), pode-se concluir que:
 - As amostras injetadas sobre o macho de aço AISI P20, apresentaram uma melhor formação, distribuição e tamanho de esferulitos (item 4.3.1).
 - Já para as peças injetadas sobre o macho de resina a parede de congelamento apresentou uma fraca orientação molecular, houve o surgimento de bandas transcrystalinas de dimensões elevadas e, em todas as configurações de temperatura para esse tipo de macho, o núcleo da peça apresentou estrutura grosseira e uniforme (item 4.3.2).
 - As amostras injetadas sobre o macho de Alumínio apresentam uma estrutura parede/núcleo bem definida, cuja parede vai diminuindo ligeiramente de largura com o aumento de temperatura ao mesmo tempo em que se torna mais esferulítica. Além disso, essas amostras apresentaram uma estrutura esferulítica normal e de dimensões bastante uniformes ao longo de toda a espessura.
 - Para as amostras injetadas sobre o Zamak, as paredes de congelamento, apresentam-se bem definidas, com dimensões e aparência semelhantes de ambos os lados. Com o aumento da temperatura da cavidade as paredes de congelamento tornam-se mais esferulíticas. Em particular, para as amostras injetadas a 30°C, os esferulitos encontrados no núcleo dessas peças apresentam formação grosseira.
- Em relação ao comportamento mecânico (item 4.5), avaliado nesse trabalho através dos ensaios de resistência ao impacto e resistência à tração, observa-se que as amostras injetadas sobre o inserto macho de Resina apresentaram propriedades mecânicas

(estudadas nesse trabalho) inferiores as amostras injetadas sobre os insertos machos metálicos. Isso se dá devido à inter-relação entre os diferentes parâmetros de processo adotados (item 3.6.2), morfologia cristalina observada (item 4.3) e as diferenças apresentadas no grau de cristalinidade (item 4.4).

- Em relação ao estudo dimensional realizado, o percentual de contração de uma peça de plástico está diretamente relacionado à temperatura, tanto do molde quanto da temperatura da massa plástica fundida, que para esse trabalho foi constante para todas as configurações estudadas. Quanto maior a temperatura do molde, maior o grau de contração. Para um polímero semicristalino, como o caso do polipropileno, o percentual de contração esperado fica em torno de 1 a 2,5%. Na grande maioria das peças, de todas as configurações estudadas, a contração observada ficou nesse intervalo (item 4.6). Somente para a dimensão de espessura da peça esses valores extrapolaram, exceto as configurações de Resina que foram injetadas com valores diferenciados de pressão de injeção, pressão de recalque, tempo de injeção, tempo de recalque e velocidade de injeção. Essas alterações resultaram em peças preenchidas de maneira mais eficiente.
- Quanto ao aspecto visual das peças obtidas (Tabela 18 no item 4.7), observa-se que as diferenças nas amplitudes térmicas, ocorridas pelas diferenças na condutividade térmica dos materiais usados, além das diferenças na temperatura do molde, afetam no acabamento superficial dessas peças. Além disso, os tempos de resfriamento também afetam na qualidade da peça. Peças resfriadas mais lentamente apresentaram mais brilho superficial. Em relação às linhas de solda, quanto menor o gradiente de temperatura no processo (temperatura do molde mais perto da temperatura do fundido) mais uniforme será a linha de solda, existindo pouca ou nenhuma anisotropia estrutural.
- Através da análise de RBS, detectou-se a influência de cada material utilizado nos machos na superfície da peça injetada, sob o ponto de vista de contaminação por elementos metálicos (item 4.8.1). Observou-se que as peças injetadas sobre o inserto macho de AISI

P20 apresentaram a incorporação de cromo. Nas peças injetadas sobre o inserto macho de Alumínio e nas peças injetadas sobre o inserto macho de Resina pode-se observar a presença de alumínio na superfície, sendo que nas amostras injetadas sobre o inserto macho de Alumínio a contagem do elemento alumínio pode ser considerada muito baixa. Além de alumínio, as peças injetadas sobre o inserto macho de Zamak, também incorporaram cromo, molibdênio, ferro, cobre, zinco, níquel e manganês.

- Não foram realizados estudos de durabilidade de ferramental para os insertos macho de materiais metálicos. Para isso, seria necessário disponibilizar um grande investimento de matéria prima e de tempo, visto que para alguns materiais aplicados nesse trabalho se espera lotes de 500 mil a 1 milhão de peças (aço AISI P20). Além disso, seria necessário um estudo dimensional apurado com instrumentos de medição de alta resolução, já que são esperados valores diminutos nesse tipo de medida. Nesse trabalho, somente o desgaste do inserto macho de Resina foi apurado, e mesmo assim, através de inspeção visual (item 4.8.2). Conforme esperado, o inserto de Resina apresentou uma limitação na quantidade de ciclos, suportando 200 ciclos na configuração de 50°C, onde nenhuma alteração na integridade da peça e do inserto foi observada. Como não houve nenhuma variação nas amostras e no inserto macho, preferiu-se adotar os valores simulados para a configuração de 50°C para o aço AISI P20, com o intuito de analisar a durabilidade desse componente com esses parâmetros. Com isso, puderam ser realizadas conclusões mais precisas sobre os cuidados necessários com os parâmetros de processo para Ferramental Rápido utilizando resinas epoxídicas. Nessas condições de processo, somente 35 peças conseguiram ser injetadas e, no total foram injetadas com esse inserto de resina 325 peças.
- Em relação à viabilidade econômica para obtenção de Ferramental Rápido, basicamente dois aspectos principais foram comparados no decorrer desse trabalho: custo da matéria-prima e custo da hora de usinagem (item 4.9). Observou-se uma redução significativa no tempo, e conseqüentemente no custo final dos elementos moldantes, como por exemplo,

uma redução de 45% no tempo de fabricação e de 69% no custo final (usando-se resina epoxídica ao invés de aço AISI-P20). Os resultados apresentados demonstraram o interesse econômico do uso de materiais alternativos na construção de moldes de injeção.

5.3 Recomendações para futuros trabalhos

No decorrer desse trabalho encontraram-se e identificaram-se algumas dificuldades e limitações que devem ser estudadas futuramente, entre elas:

- Definir quais os melhores parâmetros de processo de injeção, para cada tipo de material alternativo estudado nesse trabalho, vão resultar em peças injetadas com as mesmas características mecânicas e químicas das peças injetadas sobre cavidades de materiais convencionalmente utilizados na indústria transformadora de polímeros (aço para moldes).
- Fazer um estudo dimensional de desgaste de ferramental através de técnica de RBS e instrumentação de medição e relacioná-lo com o tamanho de lotes produzidos por Moldes Híbridos.
- Criar e analisar geometrias de peças mais complexas, que apresentem nervuras e necessidade de pinos extratores.
- Refazer esse estudo com os blocos moldantes (macho e fêmea) do mesmo material e injetando polímeros de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] POUZADA, A. S., "Moldes para produção de peças poliméricas," in *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. vol. 1, CENTIMFE, Ed. Marinha Grande, 2003.
- [2] GRISKEY, R. G., *Polymer Process Engineering*. Londres: Chapman&Hall, 1995.
- [3] CANEVAROLO, S. V., *Ciência dos Polímeros*. São Paulo: Artliber, 2004.
- [4] STRONG, A. B., *Plastics, Materials and Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [5] SHACKELFORD, J. F., *Materials Science for Engineers*, 5ª ed. New Jersey: Prentice-Hall., 2000.
- [6] REES, H., *Mold engineering*. Munique: Hanser, 1995.
- [7] MICHAELI, W., GREIF, H., KAUFMANN, H., e VOSSEBÜRGER, F., *Tecnologia dos Plásticos*. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- [8] CUNHA, A., "Moldação por injeção e materiais plásticos," in *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. vol. 2, CENTIMFE, Ed. Marinha Grande, 2003.
- [9] LATADO, A., EMBIRIÇU, M., MATTOS, A. G., e PINTO, J. C., "Modelagem de propriedades finais de resinas de polipropileno e copolímeros de propeno e eteno: II – Temperatura de transição vítrea," in *XII COBEQ* Porto Alegre, 1998.
- [10] MANRICH, S., *Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes*. São Paulo: Artliber 2005.
- [11] KOHAN, M. I., *Nylon plastics handbook*. New York: Hanser, 1995.
- [12] PROGELHOF, R. C. e THRONE, J. L., *Polymer Engineering Principles: Properties, Processes, Tests for Design*. Munich: Hanser, 1993.
- [13] OLIVEIRA, M. J., "Microscopia óptica," in *Técnicas de Caracterização de Polímeros*, CANEVAROLO, S. V., Ed. São Paulo: Artliber, 2004, p. 448.
- [14] LOTTI, C., "*Influência das condições de processamento na morfologia e nas propriedades mecânicas de sistemas poliméricos moldados por injeção e sua predição através de redes neurais artificiais*," 2004, p. (Tese de doutorado) - UFSCar, São Carlos, 2004.
- [15] HARADA, J., *Moldes de Injeção de Termoplásticos – Projetos e princípios básicos*. São Paulo: Artliber, 2004.
- [16] BROWN, R. L. E., *Design and Manufacture of Plastics Parts*. New York: John Wiley & Sons, 1980.

- [17] DIHLMANN, C., "*Simulação e análise do preenchimento de cavidades em moldes para injeção de termoplásticos utilizando método manual e tecnologia CAE/CAD*," 1993, p, (Dissertação de mestrado) - UFSC, Florianópolis, 1993.
- [18] ROSATO, D. e ROSATO, D. V., *Injection Molding Handbook*. New York: Chapman & Hall, 1995.
- [19] MENGES, G., MICHAELI, W., e MOHREN, P., *How to make injection molds*, 3ª ed. Munich: Hanser, 2000.
- [20] GRANJA, D., "Materiais para moldes," in *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. vol. 4, CENTIMFE, Ed. Marinha Grande, 2003.
- [21] CRACKNELL, P. S. e DYSON, R. W., *Handbook of thermoplastics injection mould design*, 1ª ed. Londres: Chapman&Hall, 1993.
- [22] MORATELLI, M. e COSTA, C. A., "Seleção de aços para cavidades/machos de moldes de injeção," in *Máquinas e Metais*, 428 ed. vol. XLII, 2006, pp. 144-161.
- [23] BUSATO, F. A., "*Parâmetros de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricados por estereolitografia com resina SOMOS 7110®*," 2004, 146 p, (Dissertação de mestrado) - UFSC, Florianópolis, 2004.
- [24] PONTES, A., "Técnicas assistidas por computador no projecto e fabrico de moldes - Complementos e anexos," in *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. vol. 10, CENTIMFE, Ed. Marinha Grande, 2004.
- [25] KENNEDY, P., *Flow Analysis of injection molds*. Munique: Hanser, 1995.
- [26] CANOVA, C., MOSSI, A. C., PARIONA, M. M., e CARVALHO, B. M., "Finite element simulation of the cooling phase of rotational molding process," in *Polymer Processing Society PPS2004* Florianópolis, 2004.
- [27] FOX, R. W., MCDONALD, A. T., e PRITCHARD, P. J., *Introdução à mecânica dos fluidos*, 6º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- [28] TANNEHILL, J. C., ANDERSON, D. A., e PLETCHER, R. H., *Computacional fluid mechanics and heat transfer*, 2º ed. Washington DC: Taylor & Francis, 1997.
- [29] MOLDFLOW, "Fundamentos de simulação de injeção com o Moldflow.," Jundiaí: Smarttech, 2006.
- [30] FRANK, M., JOSHI, S. B., e WYSK, R. A., "Rapid prototyping as an integrated product/process development tool an overview of issues and economics," *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 20, p. 6, 2003.
- [31] MESQUITA, R., SIMÕES, F. C., CASIMIRO, R. S., e JANZ, G. B., "Tecnologias de Prototipagem Rápida na Indústria de Componentes Automóvel Nacional: Estudo do Estado da Arte," Braga: ITEC, 1999.

- [32] CHUA, C. K., TEH, S. H., e GAY, R. K. L., "Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, pp. 597-603, 1999.
- [33] CHEAH, C. M., CHUA, C. K., LEE, C. W., FENG, C., e TOTONG, K., "Rapid Prototyping and Tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, pp. 308-320, 2004.
- [34] ARAÚJO, B., *Fabrico Rápido de Ferramentas para Injecção de Termoplásticos: FRF- Fabrico Rápido de Ferramentas*, disponível em: <http://www.frfonline.com>, acessado em: 25/09/2006.
- [35] DUTSON, A. J. e WOOD, K. L., "Using rapid prototypes for functional evaluation of evolutionary product designs," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 11, pp. 125-131, 2005.
- [36] EVANS, M. A., "Rapid prototyping and industrial design practice: can haptic feedback modelling provide the missing tactile link?," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 11, pp. 153-159, 2005.
- [37] HAGUE, R., MANSOUR, S., e SALEH, N., "Design opportunities with rapid manufacturing," *Assembly Automation*, vol. 23, pp. 346-356, 2003.
- [38] VOLPATO, N., AMORIN, J., e MANENTE, M., "The use of epoxy resins as inserts for injection mould," in *COBEM2003* São Paulo, 2003.
- [39] CHUA, C. K., HONG, K. H., e HO, S. L., "Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, pp. 604-608, 1999.
- [40] SARAIVA, V. e SOARES, R., "Processo - Técnicas não convencionais," in *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. vol. 9, CENTIMFE, Ed. Marinha Grande, 2003.
- [41] FOGGIATO, J. A., "Utilização do processo de moldagem por fusão e deposição (FDM) na fabricação rápida de insertos para injeção de termoplásticos," 2005, 182 p, (Tese de doutorado) - UFSC, Florianópolis, 2005.
- [42] JIANG, X., LIU, X., e ZHANG, C., "Feasibility study of a new rapid tooling process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005.
- [43] MARTINHO, P., BÁRTOLO, P. J., QUEIRÓS, M. P., PONTES, A. J., e POUZADA, A. S., "Hybrid Moulds: the Use of Combined Techniques for the Rapid Manufacturing of Injection Moulds," in *VR@P2005 - 2nd Int. Conf. Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* Leiria, 2005.
- [44] ROSOCHOWSKI, A. e MATUSZAK, A., "Rapid Tooling: the state of the art," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 106, pp. 191-198, 2000.

- [45] ZEILMANN, R. P., SANTIN, R., COSTA, C. A., e POUZADA, A. S., "Tool wear in the high speed machining of injection moulds," in *Rapid Product Development RPD2006* Marinha Grande, 2006.
- [46] RAMOS, C. A. D. e MACHADO, A. R., "Usinagem de moldes e matrizes," in *8º Colóquium de Usinagem* Belo Horizonte, 2002.
- [47] VASCONCELOS, P. V., LINO, F. J., e NETO, R. J., "Importance of the vacuum in rapid tooling of polymeric-based moulds," in *RPD 2004* Marinha Grande, 2004.
- [48] YAÑEZ, F., NETTO, A. C. S., BIAVA, M., PIRES, A. T. N., SALMORIA, G. V., e AHRENS, C. H., "Investigation of the thermal behavior of rapid tools of epoxy-aluminum resin during the injection molding of PP and PET," in *PPS2004* Florianópolis, 2004.
- [49] NETTO, A. C. S., V., Y. F. A., AHRENS, C. H., e V., S. G., "Effects of mixing parameters on the quality of composite epoxy-aluminum tools," in *PPS2004* Florianópolis, 2004.
- [50] CARDON, L. e MARTINEZ, D. L., "The effect of the cooling phase on the degree of crystallisation of polypropylene," in *Rapid Product Development RPD2006* Marinha Grande, 2006.
- [51] CARDON, L., "Thermal behaviour of hybrid injection moulds," in *Rapid Product Development RPD2004* Marinha Grande, 2004.
- [52] VOLPATO, N., FOGGIATTO, J., AMORIM, J., e FILHO, O. D., "A proposed data base to aid material selection for prototype tooling," in *Rapid Product Development RPD2006* Marinha Grande, 2006.
- [53] JESUS, M. S., "*Desenvolvimento de um compósito polímero-metal à base de resina epóxi para aplicações em moldes rápidos,*" 2005, 102 p, (Dissertação de mestrado) - UFSC, Florianópolis, 2005.
- [54] SHAN, Z., YAN, Y., ZHANG, R., LU, Q., e GUAN, L., "Rapid Manufacture of Metal Tooling by Rapid Prototyping," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 469-475, 2003.
- [55] KASZYNSKI, J., "Tooling materials for plastics molding applications," in *Manufacturing engineering handbook* New York: McGraw-Hill, 2004.
- [56] GERDAU, *Aços Finos Piratini - Manual de aços*, disponível em: www.gerdau.com.br, acessado em: 04/02/2005.
- [57] ASERM, *Moldes de alumínio*, disponível em: www.aserm.net, acessado em: 23/11/2006.
- [58] GROSS, D. K., "Zinc Die Castings-The importance of Alloy Chemistry.," in *Die Casting Engineer*. vol. 3 Toronto, 2003, pp. 300-331.

- [59] HUNTSMAN, *Manual de treinamento para fundição de resinas de prototipagem rápida*. São Paulo, 2006.
- [60] DECLOEDT, K. P., "The shortcut to injection moulding," in *Polymers & Moulds Innovations PMI 2005* Gent, 2005.
- [61] POLIMOLD, *Catálogo de porta moldes*, disponível em: www.polimold.com.br, acessado em: 10/10/2005.
- [62] LIMA, P., RAMOS, J., e POUZADA, A. S., "Thermal performance of hybrid injection molds with epoxy inserts," in *ANTEC 2003*, Nashville, 2003.
- [63] VOLPATO, N. e AMORIN, J., "Uma análise do desempenho de resinas termofixas usadas como insertos para ferramental rápido.," in *Plástico Industrial*. vol. 77, 2005, pp. 88-107.
- [64] BARROS, I., "*Modelação do comportamento térmico de moldes de injeção*," 2004, 219 p, (Tese de doutorado) - UMinho, Guimarães, 2004.
- [65] BARROS, I., A.M., B., TEIXIERA, S. F. C. F., TEIXEIRA, J. C. F., e CUNHA, A. M., "Thermal contact resistance in injection molds," in *Polymer Processing Society PPS2004* Florianópolis, 2004.
- [66] BRASKEM, *Data Sheet - Polipropileno H503*, disponível em: www.braskem.com.br, acessado em: 20/11/2005.
- [67] BARETA, D. R., "*Metodologia para diagnóstico de um ambiente integrado para o desenvolvimento de produto em uma empresa corporativa*," 2002, 115 p, (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica) - UCS, Caxias do Sul, 2002.
- [68] ABNT, "Plásticos – atmosfera padrão para condicionamento e ensaio," "NBR 7452," 5 p, 1982.
- [69] IAP, *Ensaio físicos em polímeros*, disponível em: <http://www.planetaplastico.com.br>, acessado em: 25/10/2005.
- [70] SHASTRI, R., "Modern Plastics Handbook," in *Plastics Testing*. vol. 11 New York: McGraw-Hill, 2004.
- [71] FINKLER, M., "*Desenvolvimento de Compósitos com Base em Rejeito de Tecidos de Algodão e Acrílico em Matriz de Polietileno de Alta Densidade*," 2005, 91 p, (Dissertação de mestrado) - UCS, Caxias do Sul, 2005.
- [72] SCAIN, F., "*Estudo comparativo de sistemas de resfriamento em moldes para injeção de produtos aletados*," 2006, 121 p, (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica) - UCS, Caxias do Sul, 2006.
- [73] INCROPERA, F. P. e WITT, D. P., *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

- [74] MATHOT, V. B. F., *Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers*, 1° ed. Munique: Hanser, 1994.
- [75] MACHADO, L. e MATOS, J., "Análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial," in *Técnicas de caracterização de polímeros*, CANEVAROLO, S. V., Ed. São Paulo: Artliber, 2004.
- [76] BILLMEYER JR., F. W., *Textbook of Polymer Science*, 3° ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [77] KRUG, C., "*Recobrimento de Superfícies Porosas com Metalocenos: Análise Multivariada Envolvendo Caracterização com Feixes de Íons*," 2000, p, (Dissertação de mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- [78] NUNES, R. M., "*Caracterização por Espectrometria de Retroespalhamento Rutherford de filmes finos de nitreto e óxido de titânio*," 2005, 73 p, (Dissertação de Mestrado) - PUC-RS, Porto Alegre, 2005.
- [79] PRADO, R. J., "*Propriedades químicas e morfológicas de filmes hidrogenados de carbetto de silício amorfo*," 1997, 123 p, (Dissertação de mestrado) - USP, São Paulo, 1997.

ANEXOS

ANEXO 1 – PROJETO DO INSERTO MACHO

ANEXO 2 – SIMULAÇÃO MATEMÁTICA COMPUTACIONAL

ANEXO 3 – ESTUDO DE RUGOSIDADE E ANÁLISE DIMENSIONAL

ANEXO 4 – ENSAIO DE DSC

ANEXO 1

PROJETO DO INSERTO MACHO

Figura A1-1: Montagem da serpentina de refrigeração no inserto macho

Figura A1-2: Projeto do inserto macho

Figura A1-3: Projeto da serpentina de refrigeração

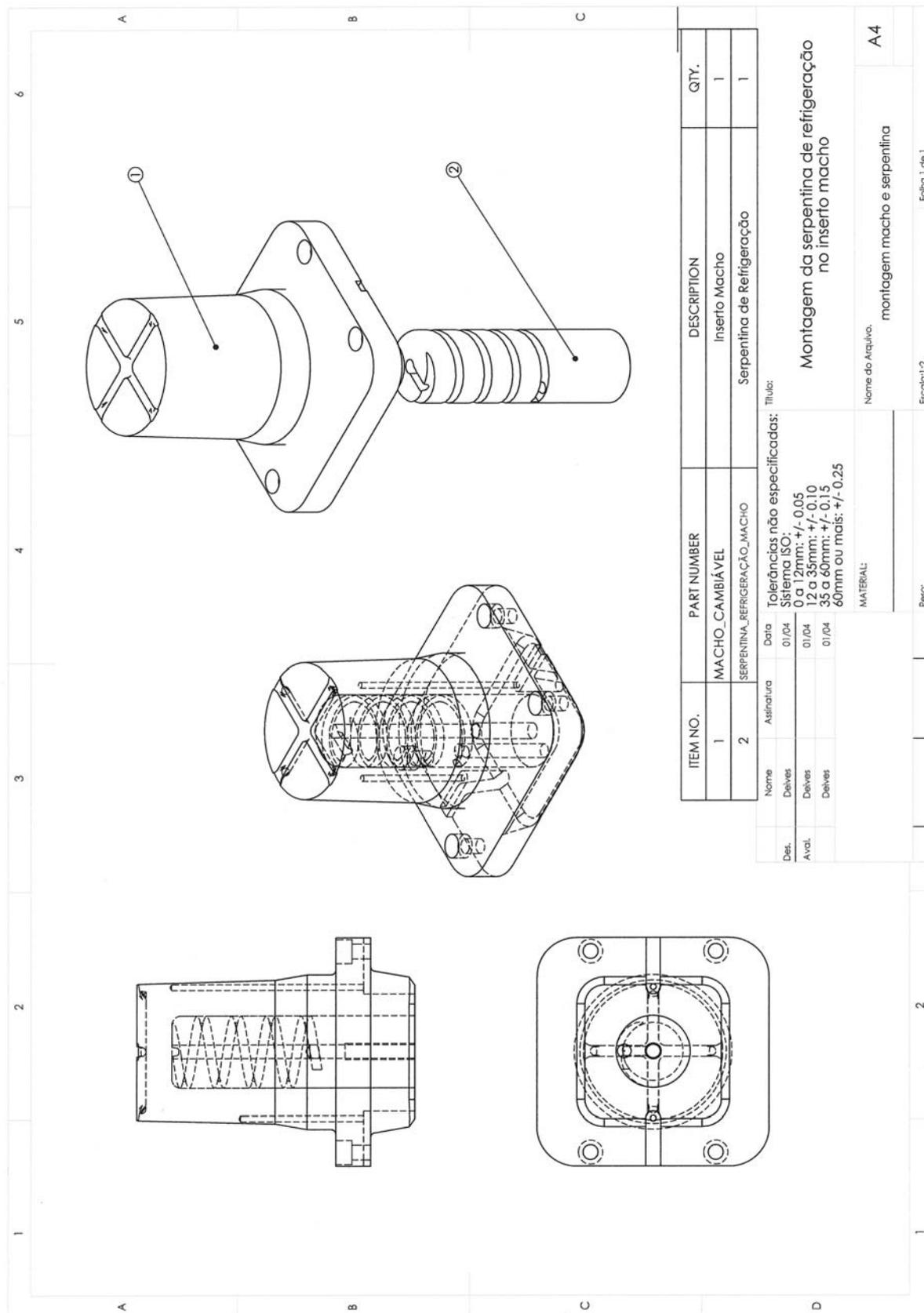


Figura A1-1: Montagem da serpentina de refrigeração no inserto macho

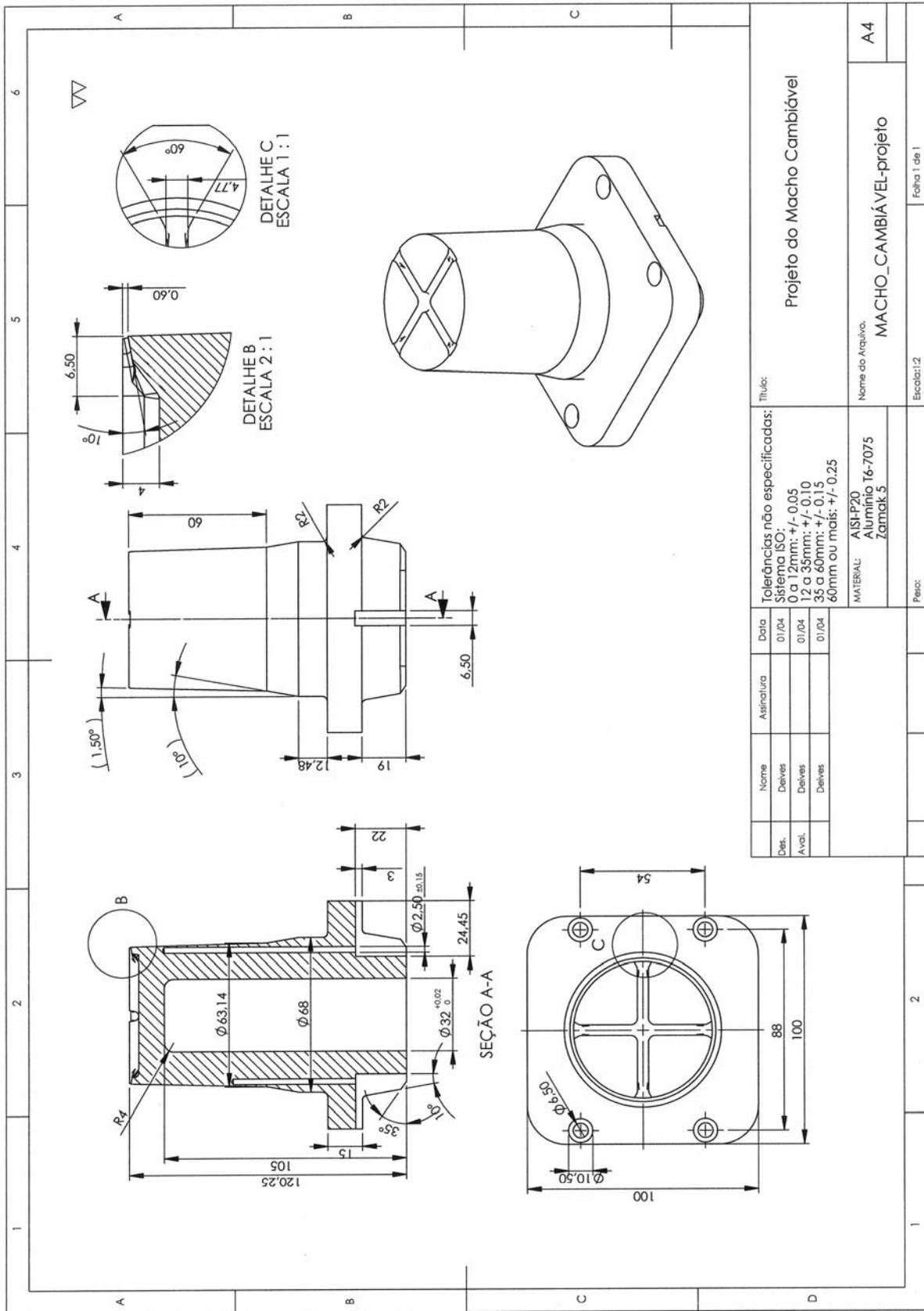


Figura A1-2: Projeto do inserto macho

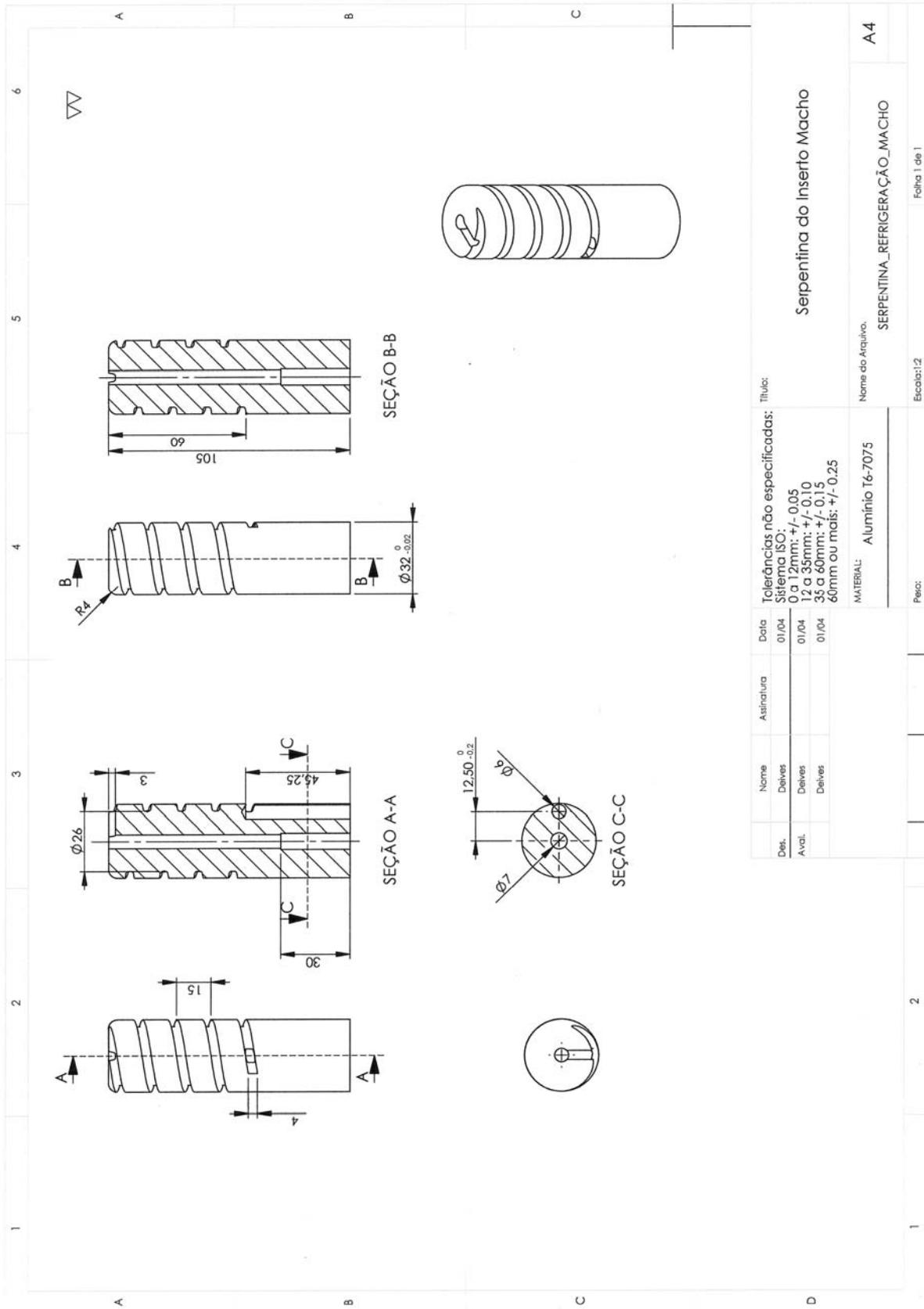


Figura A1-3: Projeto da serpentina de refrigeração

Tolerâncias não especificadas:		Título:	
Diâmetro ISO:	01/04	Serpentina do Inserto Macho	
12 a 20mm: +/- 0,05	01/04		
22 a 30mm: +/- 0,10	01/04		
32 a 60mm: +/- 0,15			
60mm ou mais: +/- 0,25			
MATERIAL: Alumínio T6-7075		Nome do Arquivo: SERPENTINA_REFRIGERAÇÃO_MACHO	
Peço:		Escala: 1:2	
Folha 1 de 1		A4	

ANEXO 2

SIMULAÇÃO MATEMÁTICA COMPUTACIONAL MOLDFLOW MPI – 6.0

Figura A2-1: Simulação matemática computacional da configuração AISI P20 – 30°C.

Figura A2-2: Simulação matemática computacional da configuração AISI P20 – 50°C.

Figura A2-3: Simulação matemática computacional da configuração AISI P20 – 70°C.

Figura A2-4: Simulação matemática computacional da configuração Resina – 30°C.

Figura A2-5: Simulação matemática computacional da configuração Resina – 50°C.

Figura A2-6: Simulação matemática computacional da configuração Resina – 70°C.

Figura A2-7: Simulação matemática computacional da configuração Alumínio – 30°C.

Figura A2-8: Simulação matemática computacional da configuração Alumínio – 50°C.

Figura A2-9: Simulação matemática computacional da configuração Alumínio – 70°C.

Figura A2-10: Simulação matemática computacional da configuração Zamak – 30°C.

Figura A2-11: Simulação matemática computacional da configuração Zamak – 50°C.

Figura A2-12: Simulação matemática computacional da configuração Zamak – 70°C.

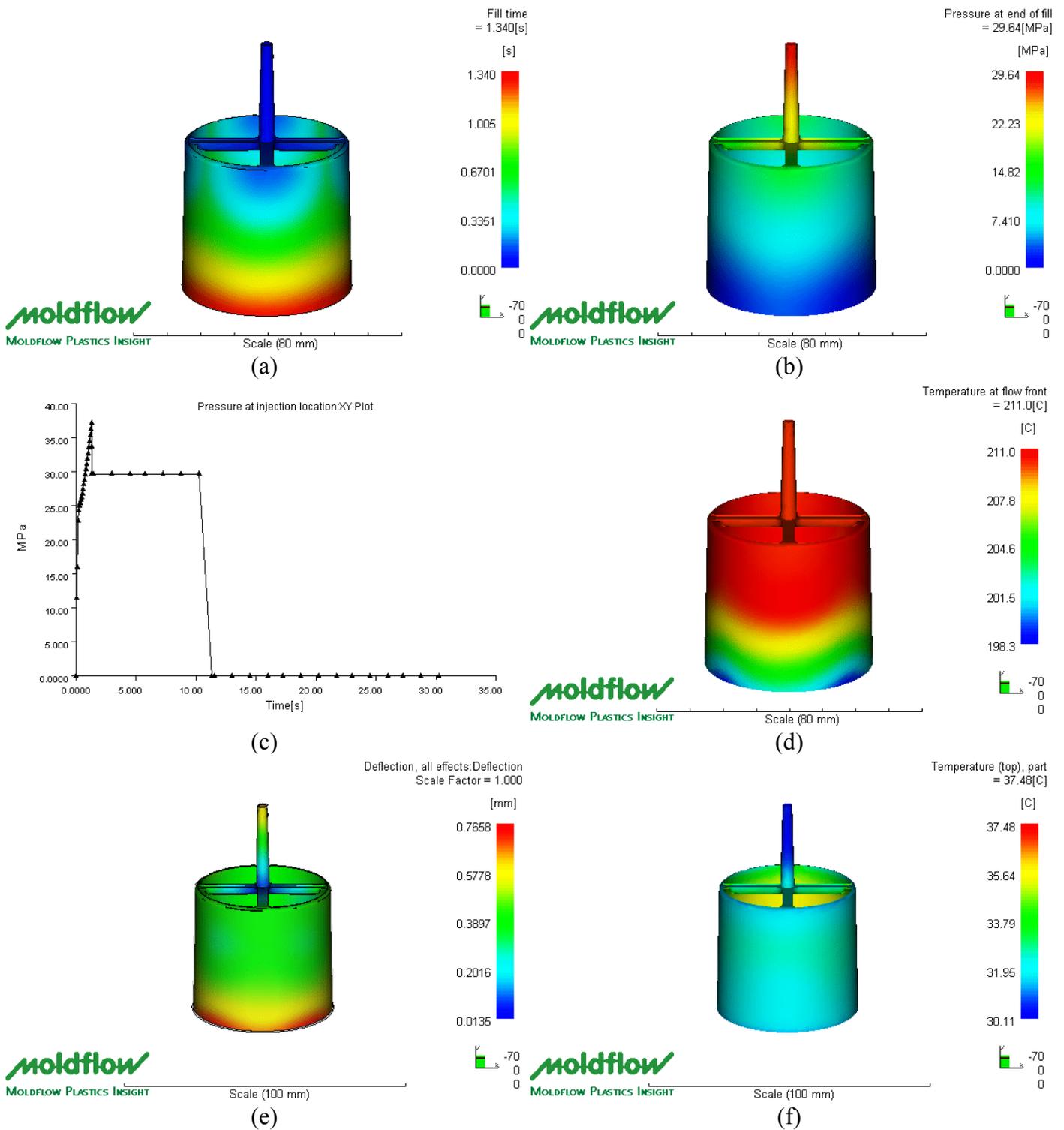


Figura A2-1: Simulação matemática computacional da configuração AISI P20 – 30°C.
 (a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento;
 (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo;
 (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.

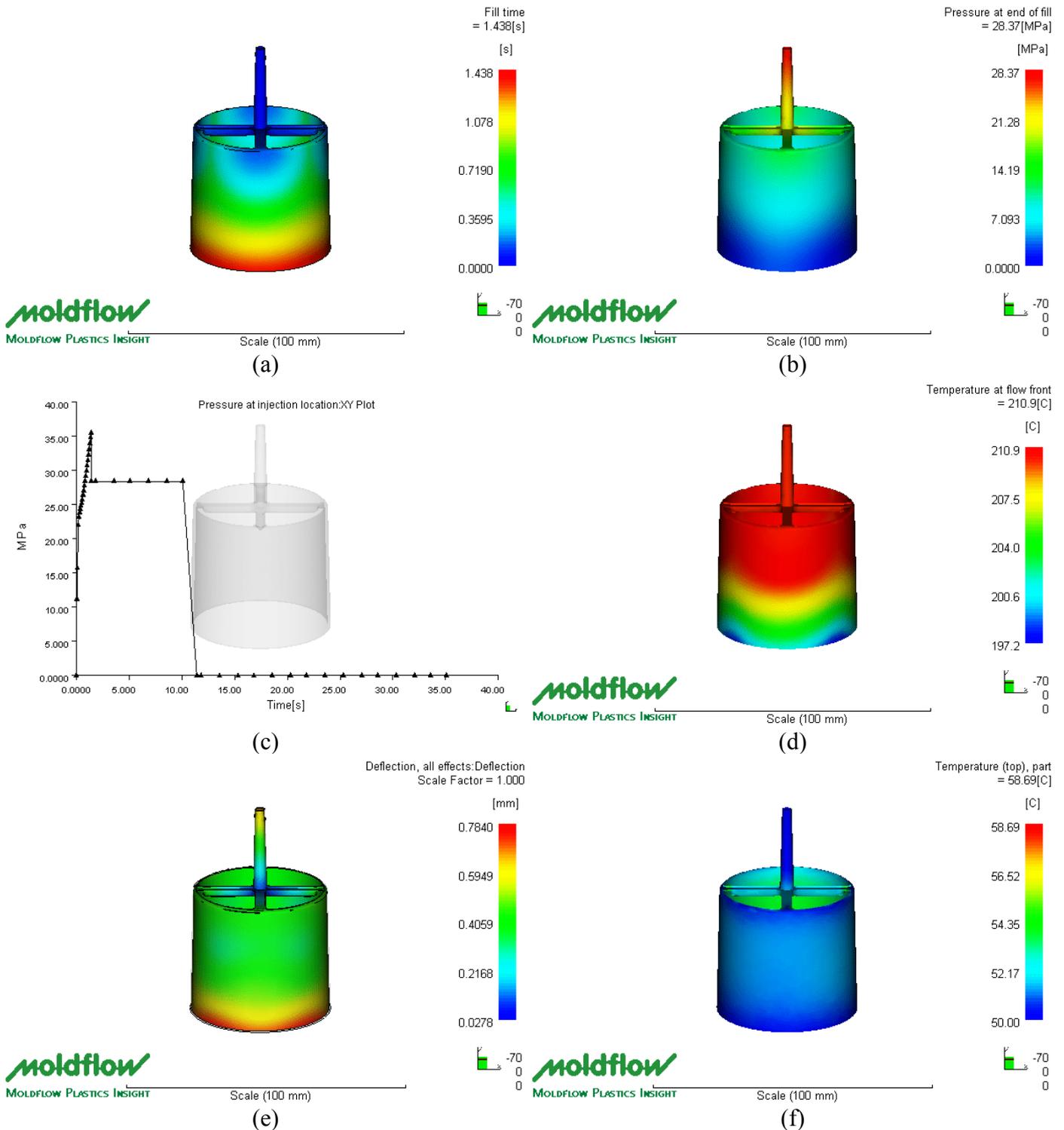


Figura A2-2: Simulação matemática computacional da configuração AISI P20 – 50°C.
 (a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento;
 (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo.
 (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.

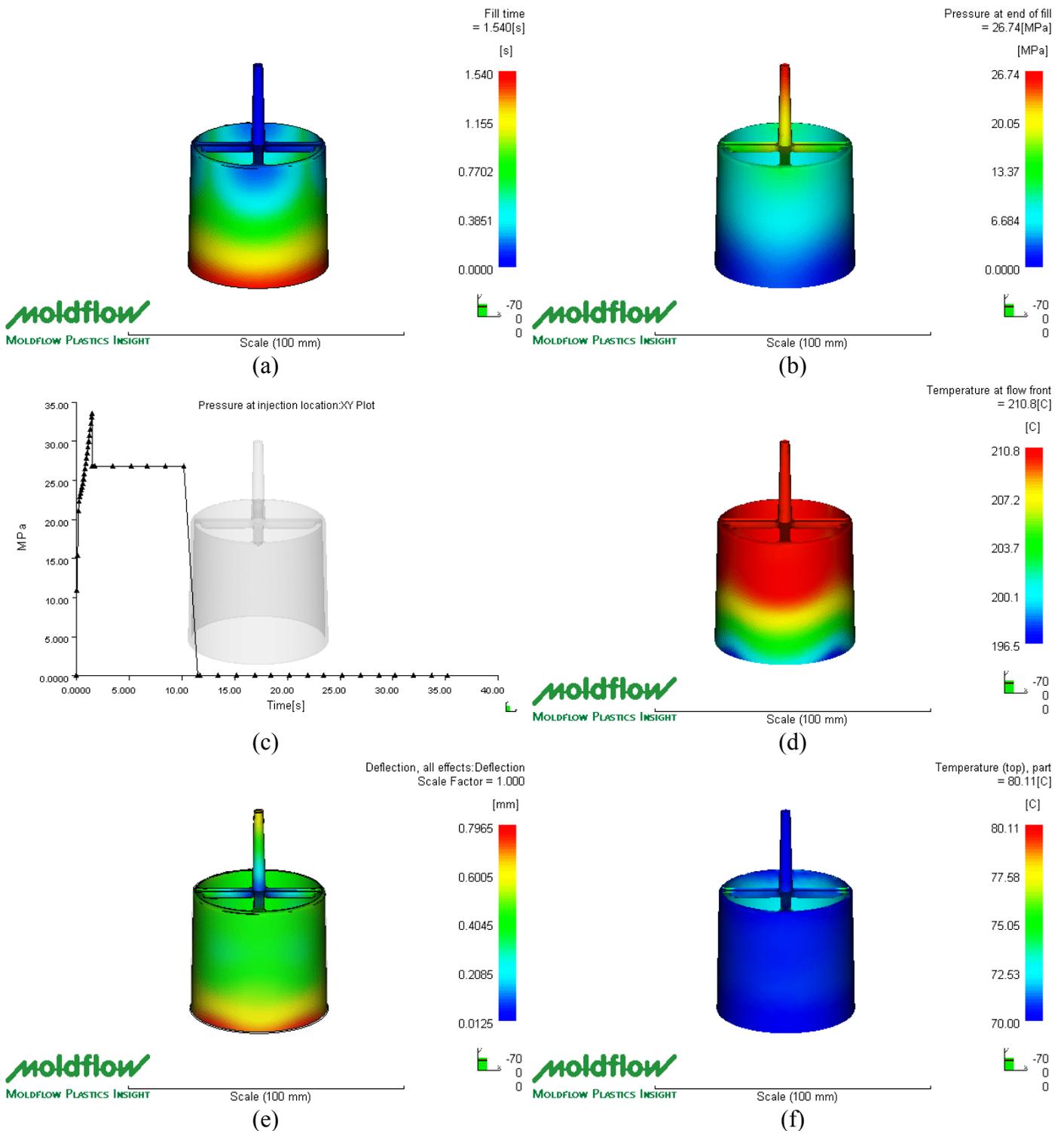
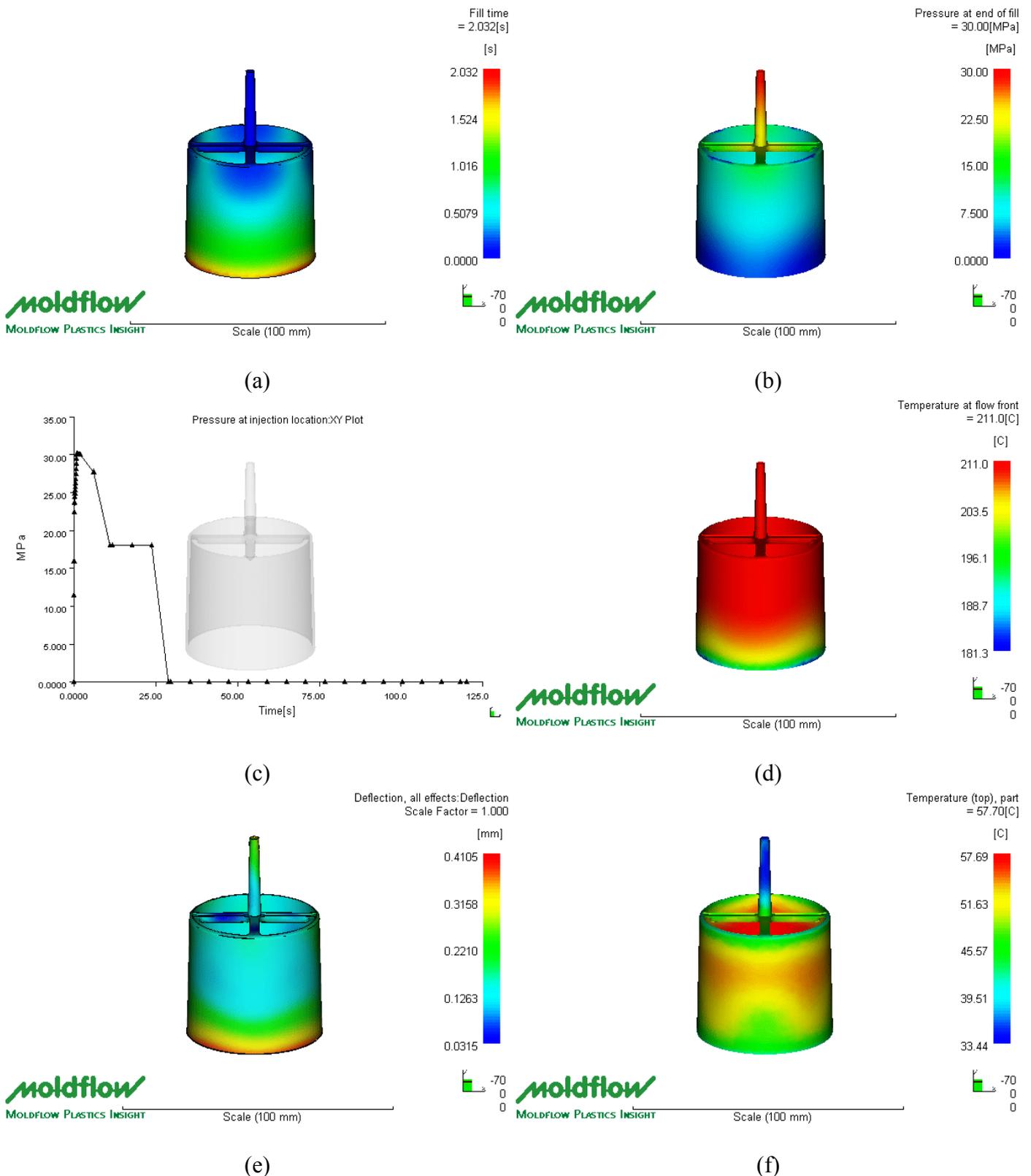
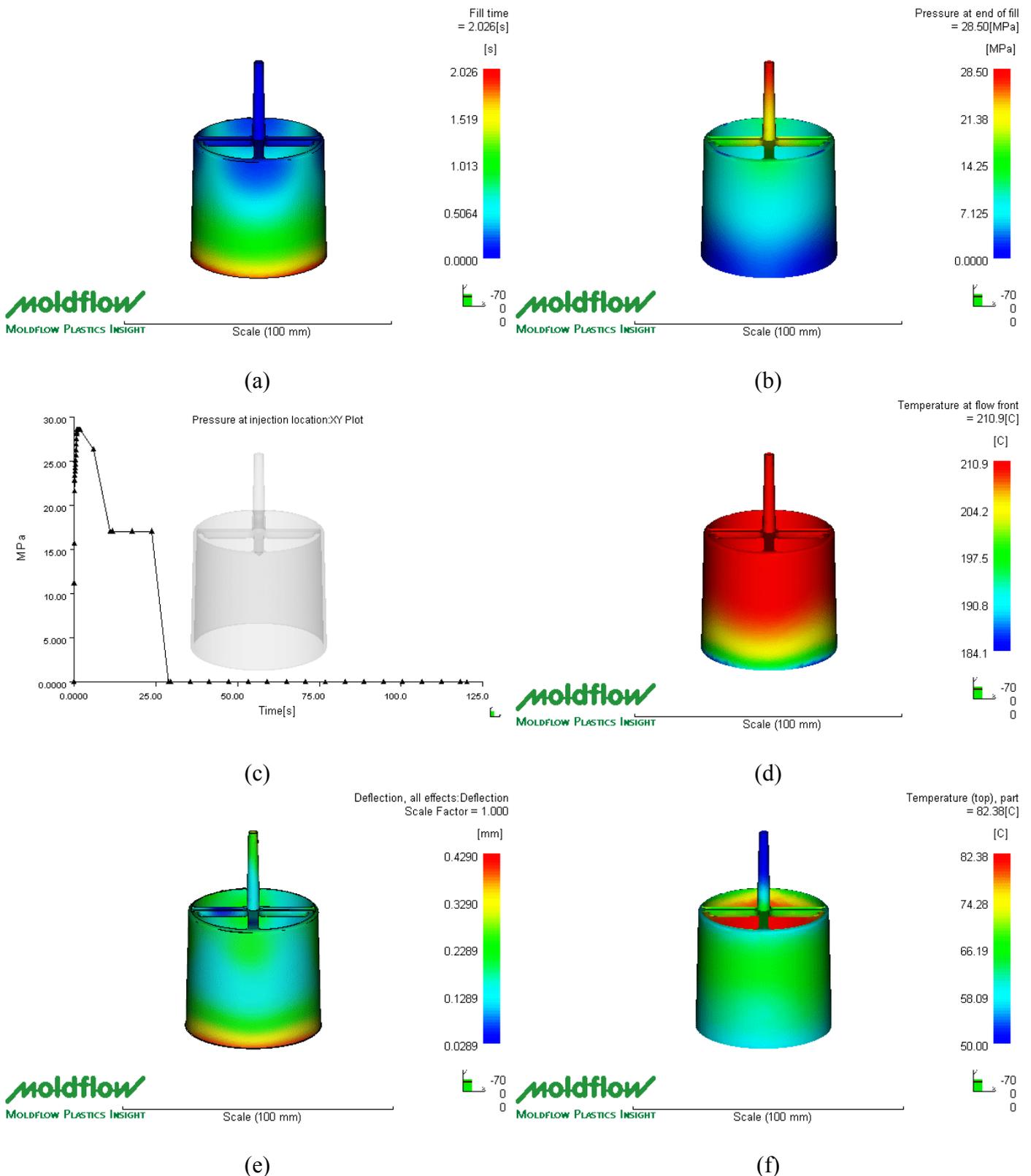


Figura A2-3: Simulação matemática computacional da configuração AISI P20 – 70°C.
 (a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento;
 (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo.
 (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.



(a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento; (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo. (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.



(a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento; (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo. (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.

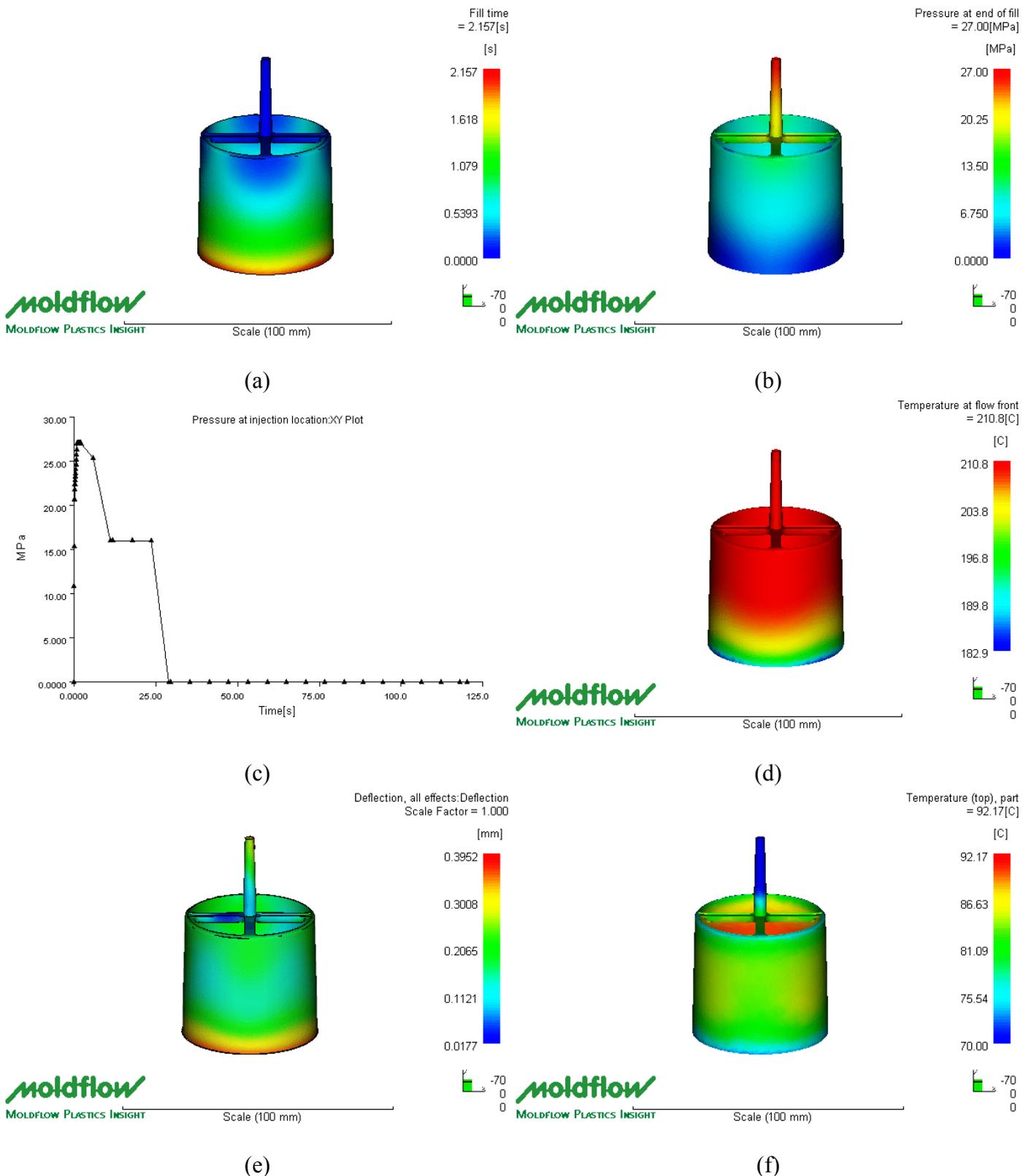
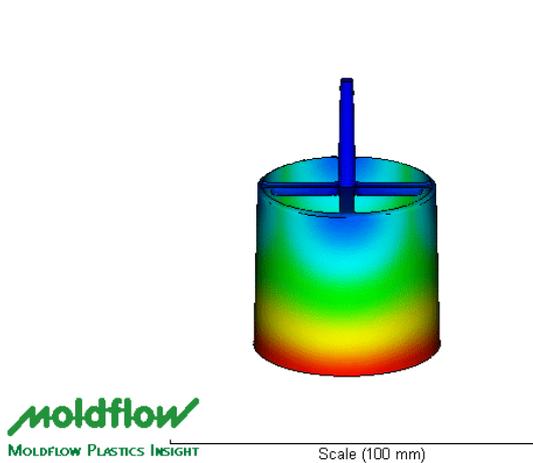
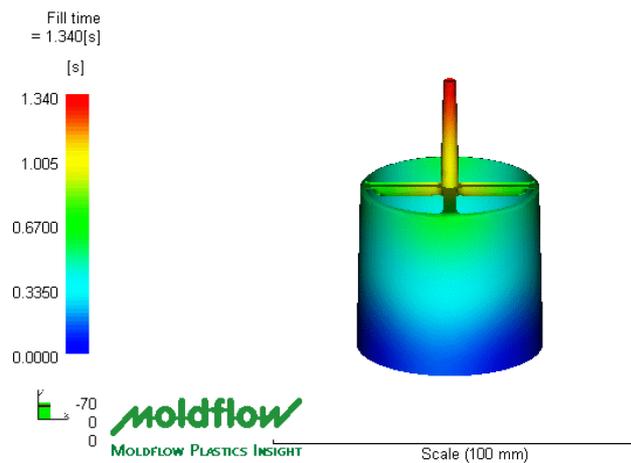


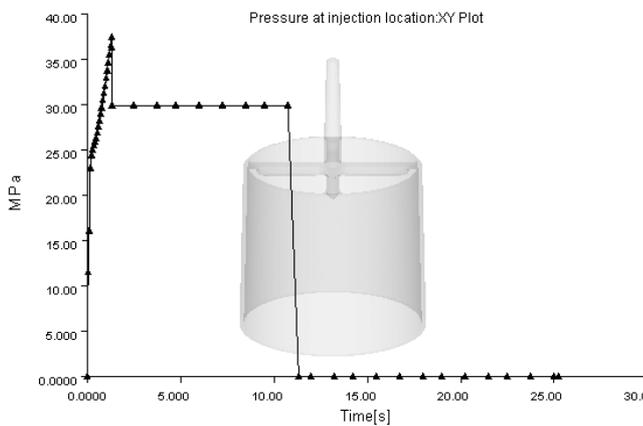
Figura A2-6: Simulação matemática computacional da configuração Resina – 70°C.
 (a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento;
 (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo.
 (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.



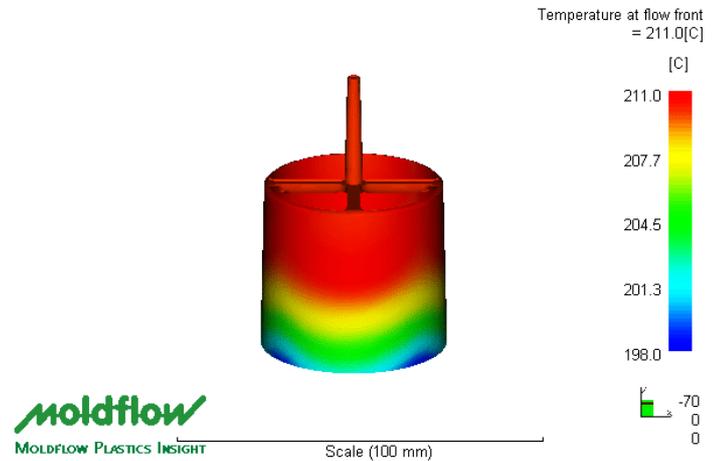
(a)



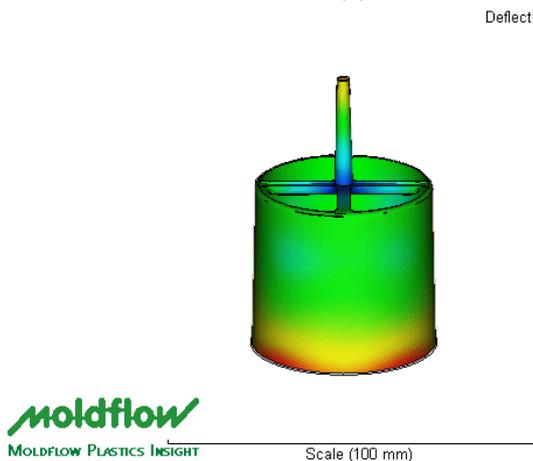
(b)



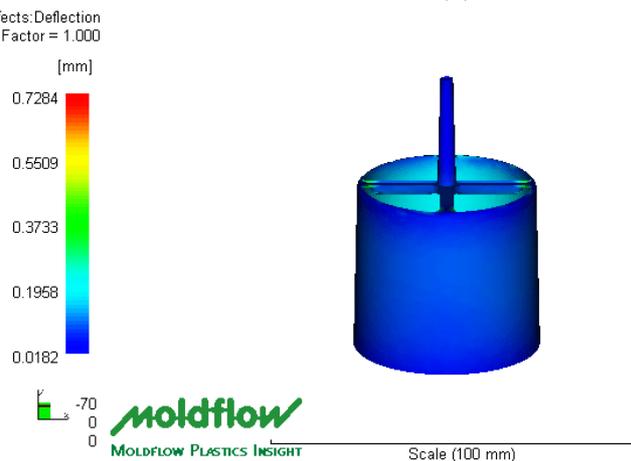
(c)



(d)

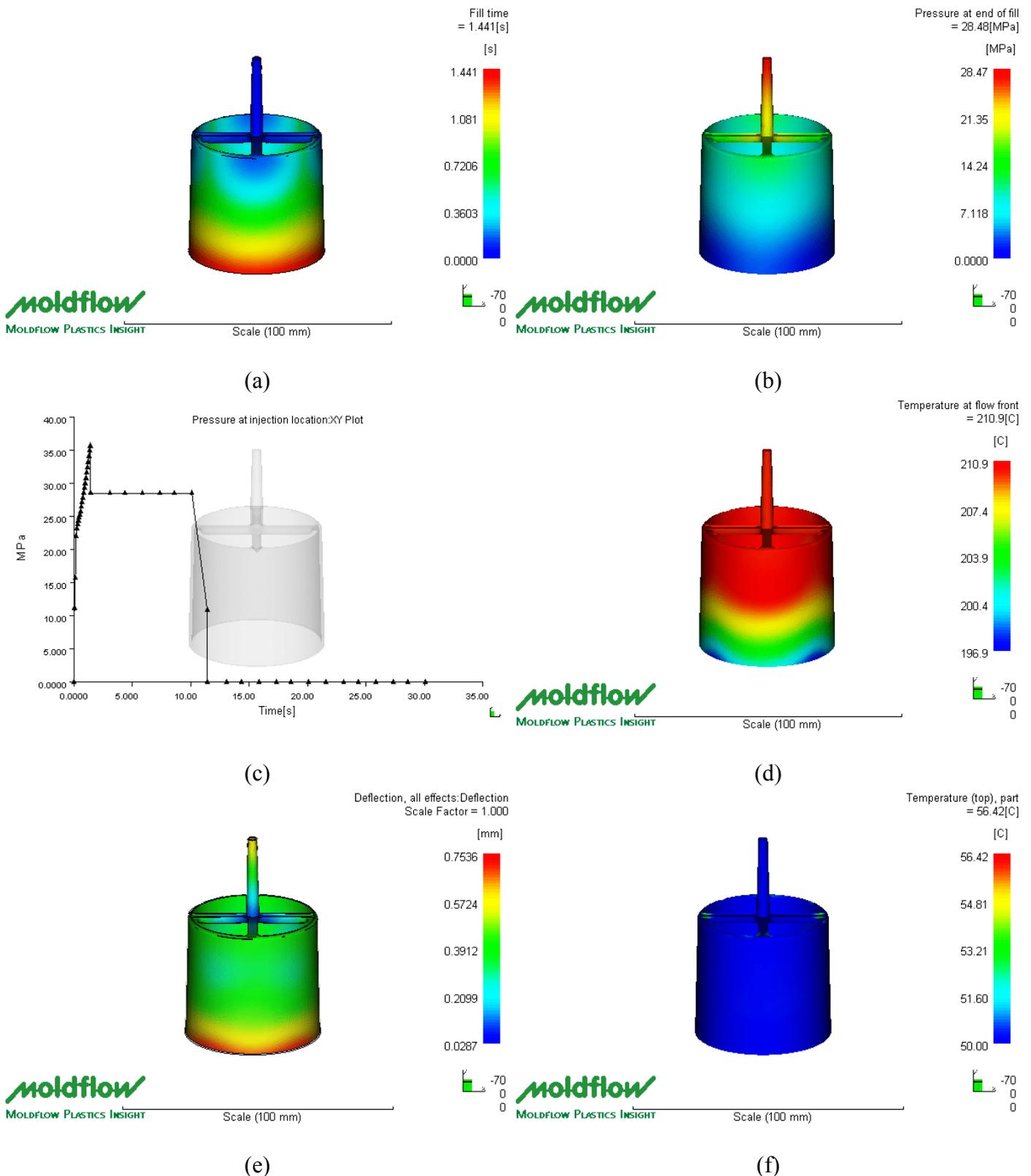


(e)

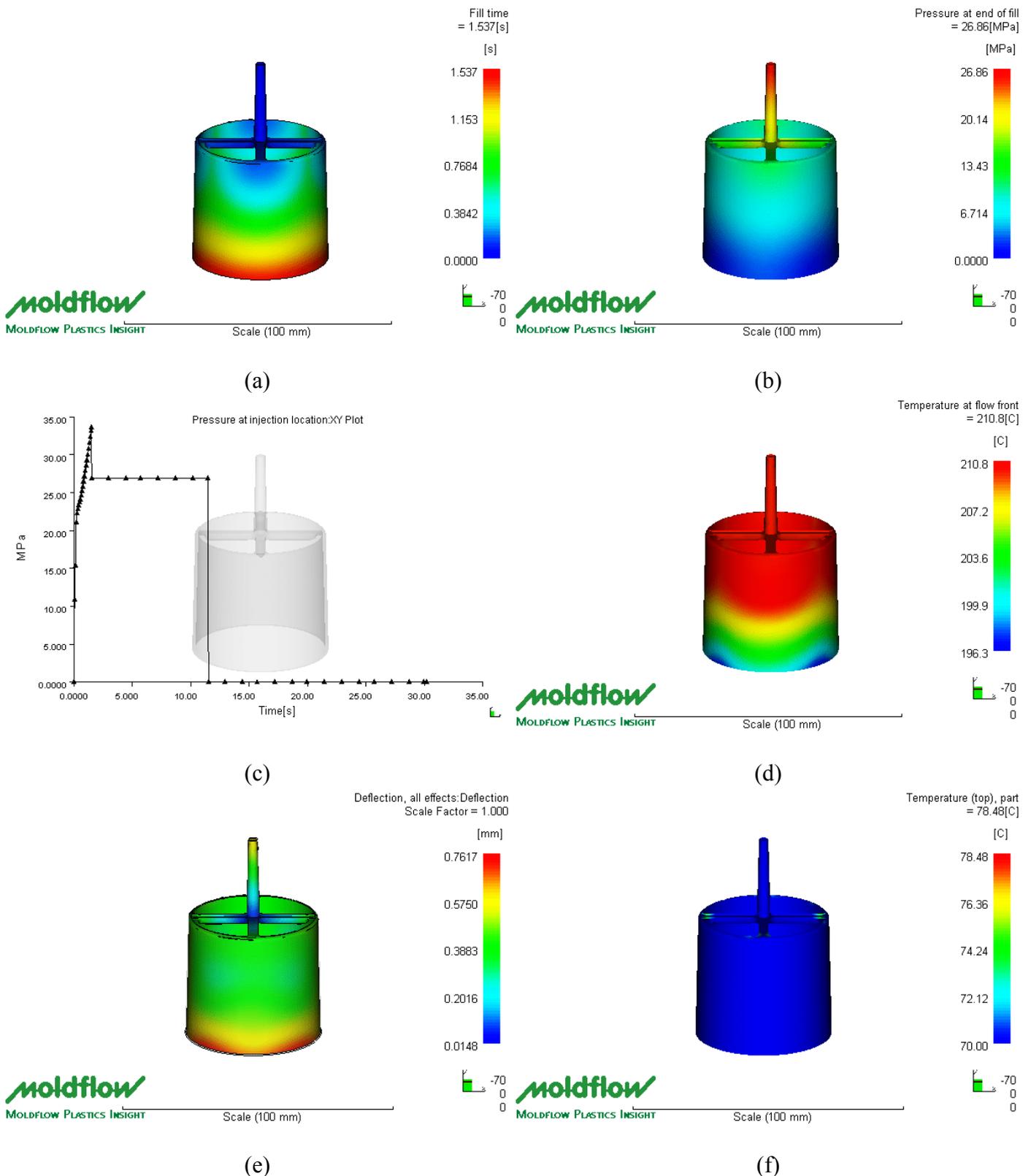


(f)

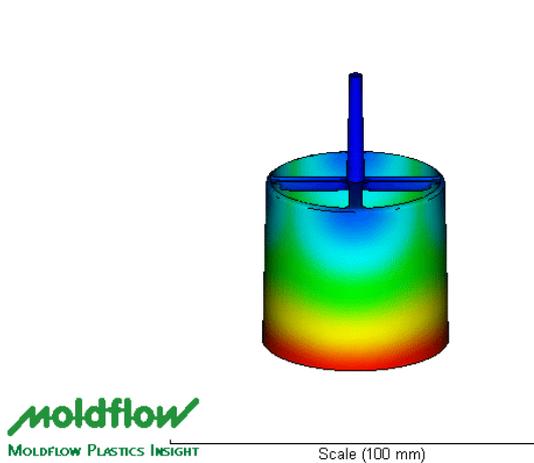
Figura A2-7: Simulação matemática computacional da configuração Alumínio – 30°C.
 (a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento;
 (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo.
 (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.



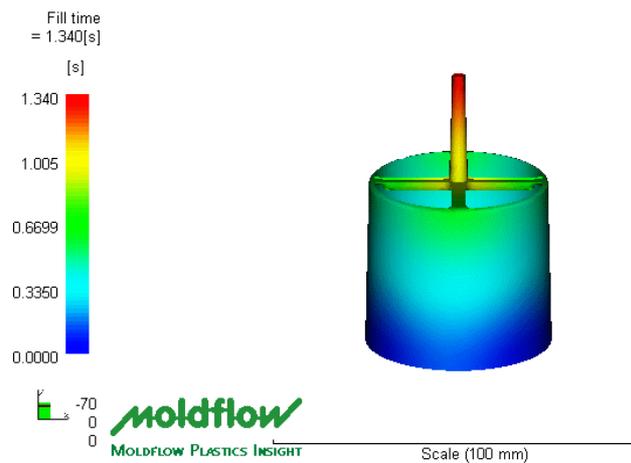
(a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento; (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo. (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.



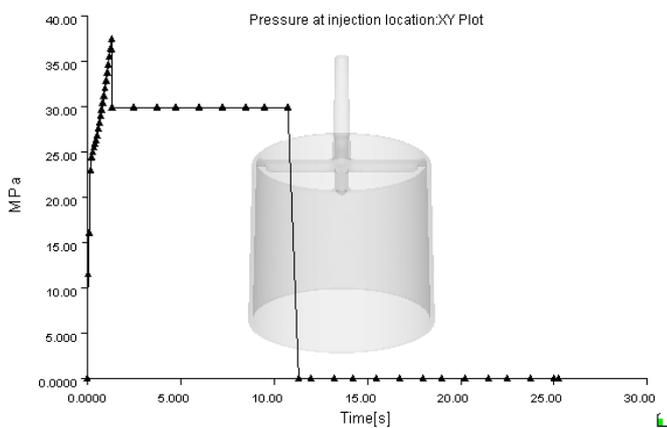
(a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento; (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo. (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.



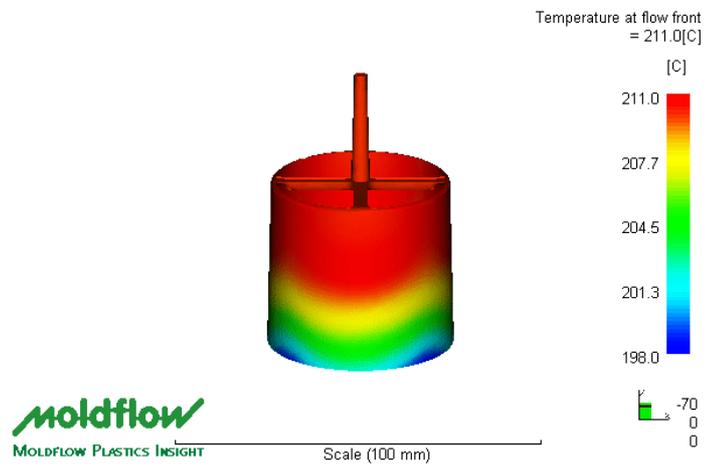
(a)



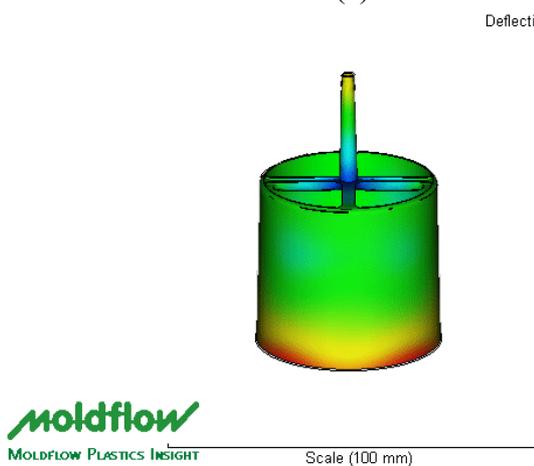
(b)



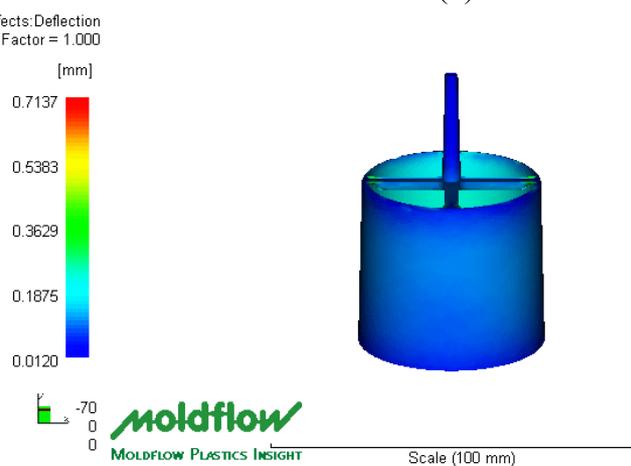
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura A2-10: Simulação matemática computacional da configuração Zamak – 30°C.
 (a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento;
 (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo.
 (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.

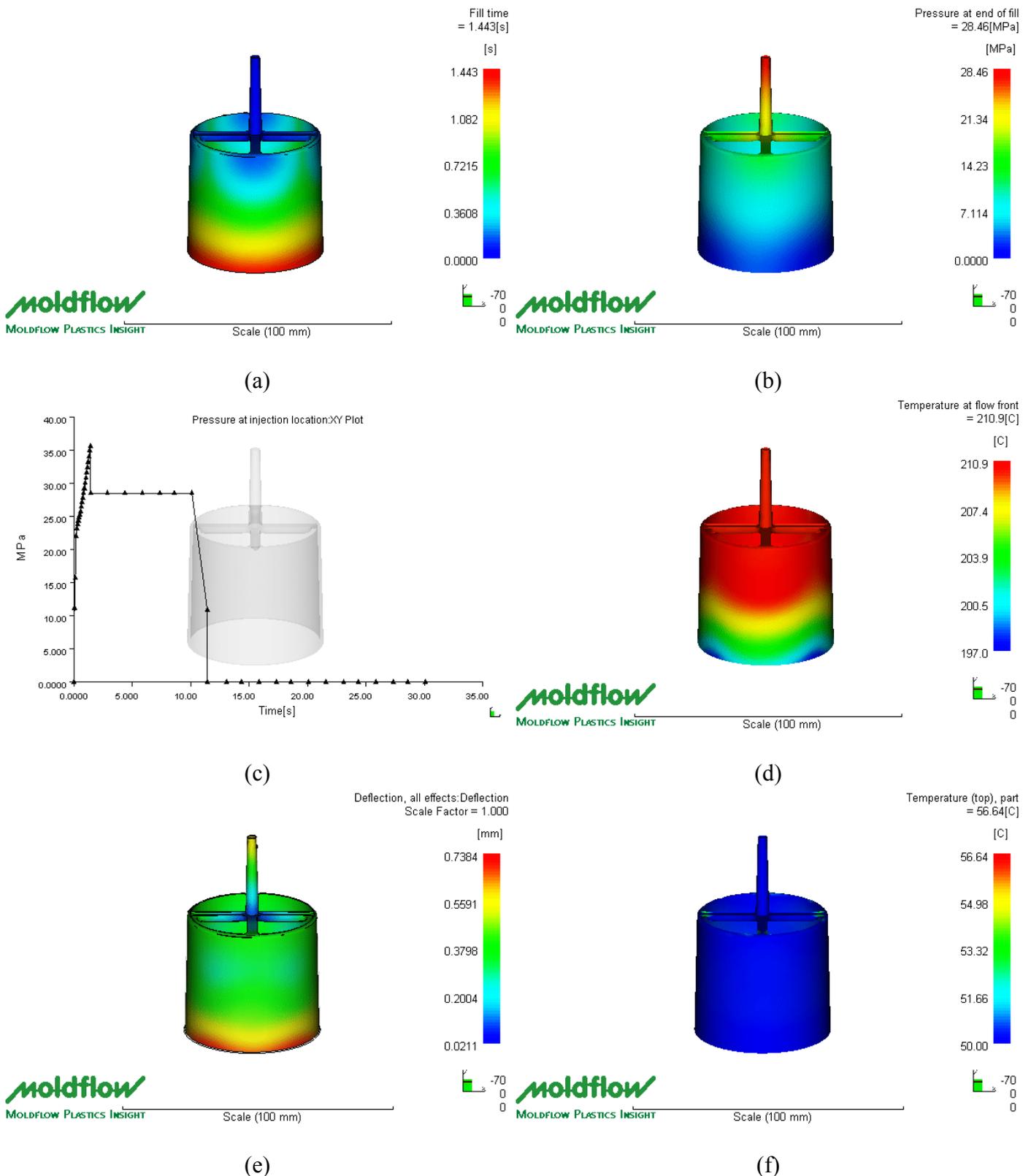
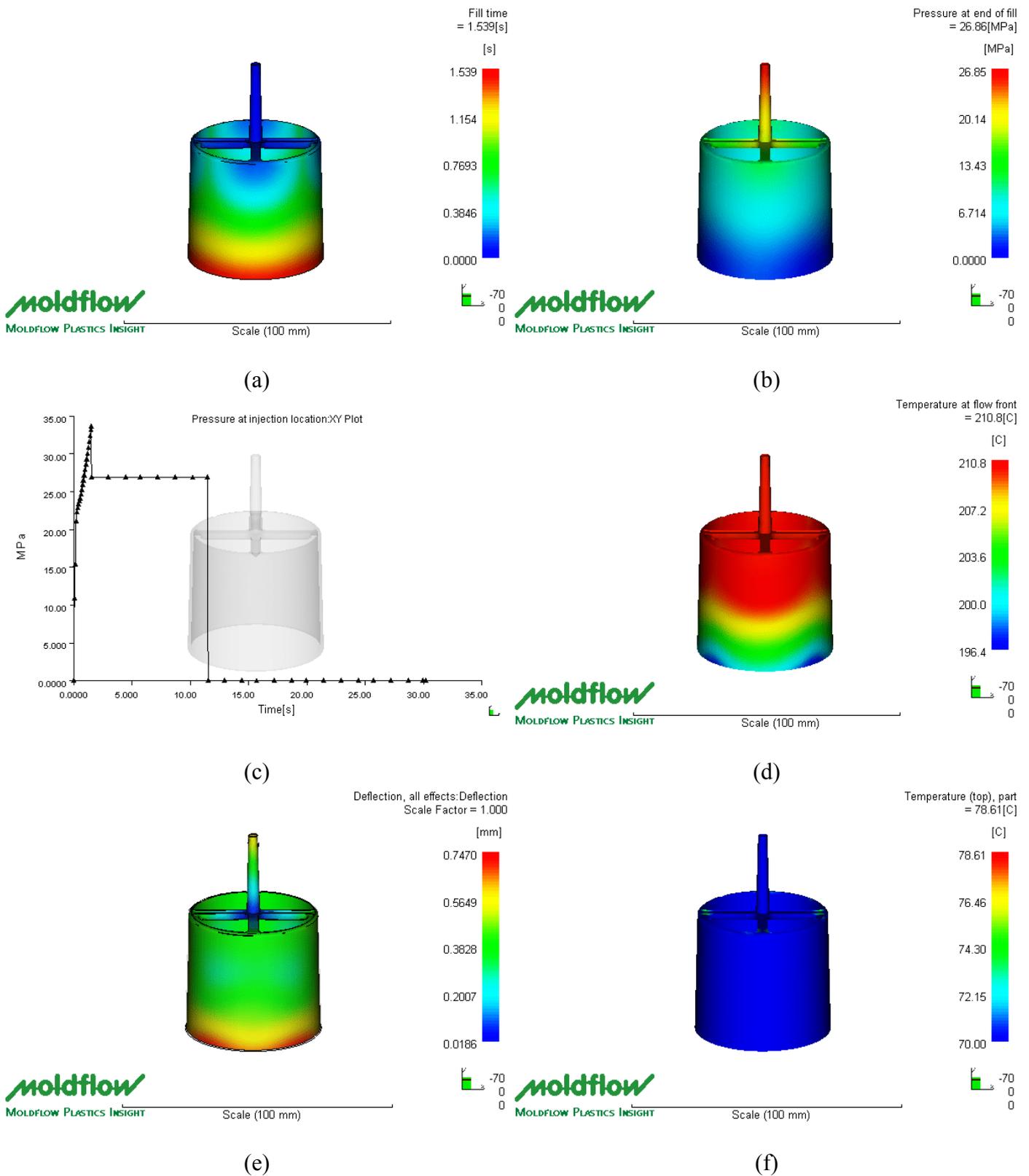


Figura A2-11: Simulação matemática computacional da configuração Zamak – 50°C.
 (a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento;
 (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo.
 (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.



(a) simulação de preenchimento; (b) simulação de pressão no final do preenchimento; (c) ciclo de injeção (pressão x tempo); (d) temperatura na frente de fluxo. (e) deflexão; (f) máxima temperatura após injeção.

ANEXO 3

ESTUDO DE RUGOSIDADE E ANÁLISE DIMENSIONAL

Tabela A3-1: Rugosidade das insertos macho.

Tabela A3-2: Rugosidade das amostras

Tabela A3-3: Resumo das dimensões avaliadas

Tabela A3-4: Dimensões das amostras injetadas a 30°C

Tabela A3-5: Dimensões das amostras injetadas a 50°C

Tabela A3-6: Dimensões das amostras injetadas a 70°C

Tabela A3-7: Contração das amostras

Figura A3-1: Posição de coleta das medidas do Diâmetro de 60mm

Figura A3-2: Posição de coleta das medidas do Diâmetro de 63mm

Figura A3-3: Posição de coleta das medidas da Altura de 60mm

Figura A3-4: Posição de coleta das medidas da espessura de 1,50mm

Figura A3-5: Posição de coleta das amostras de DSC e RBS

Figura A3-6: Posição de coleta das amostras para o ensaio de impacto

Tabela A3-1: Rugosidade das insertos macho

	Ra [e-006m]	Ry [e-006m]	Rz DIN [e-006m]
Al	0.60	5.00	4.00
	0.60	4.00	3.00
	0.60	5.00	4.00
média	0.60	4.67	3.67
desvio	0.00	0.58	0.58
<i>incerteza</i>	<i>0.00</i>	<i>0.33</i>	<i>0.33</i>
Zamak	1.00	6.00	6.00
	1.00	7.00	6.00
	0.80	8.00	5.00
média	0.93	7.00	5.67
desvio	0.12	1.00	0.58
<i>incerteza</i>	<i>0.07</i>	<i>0.58</i>	<i>0.33</i>
Resina	1.40	13.00	8.00
	1.20	11.00	7.00
	1.80	13.00	10.00
média	1.47	12.33	8.33
desvio	0.31	1.15	1.53
<i>incerteza</i>	<i>0.18</i>	<i>0.67</i>	<i>0.88</i>
P20	0.80	5.00	4.00
	0.60	6.00	4.00
	0.80	4.00	3.00
média	0.73	5.00	3.67
desvio	0.12	1.00	0.58
<i>incerteza</i>	<i>0.07</i>	<i>0.58</i>	<i>0.33</i>

Tabela A3-2: Rugosidade das amostras

Material e Temp	Ra	Ry	Rz DIN	Material e Temp	Ra	Ry	Rz DIN		
P20	30°	1.4	8	7	Zamak-5	0.4	5	4	
		1.6	10	8		30°	0.8	6	4
		1.2	9	7		0.6	7	5	
	média	1.40	9.00	7.33		média	0.60	6.00	4.33
	desvio	0.20	1.00	0.58		desvio	0.20	1.00	0.58
	incerteza	0.12	0.58	0.33		incerteza	0.12	0.58	0.33
	50°	1.2	7	6		0.6	5	4	
		1.2	7	6		50°	0.6	7	6
		1.2	8	7		0.6	5	4	
	média	1.20	7.33	6.33		média	0.60	5.67	4.67
	desvio	0.00	0.58	0.58		desvio	0.00	1.15	1.15
	incerteza	0.00	0.33	0.33		incerteza	0.00	0.67	0.67
70°	1.4	8	7	0.6	5	4			
	1	6	5	70°	0.8	5	4		
	0.8	6	5	0.6	4	3			
média	1.07	6.67	5.67	média	0.67	4.67	3.67		
desvio	0.31	1.15	1.15	desvio	0.12	0.58	0.58		
incerteza	0.18	0.67	0.67	incerteza	0.07	0.33	0.33		
AI	30°	0.8	5	4	Resina	2.6	18	14	
		0.8	7	5		30°	2.2	15	12
		0.8	6	4		2.2	15	12	
	média	0.80	6.00	4.33		média	2.33	16.00	12.67
	desvio	0.37	2.55	2.05		desvio	0.97	6.66	5.24
	incerteza	0.21	1.47	1.19		incerteza	0.56	3.84	3.03
	50°	0.8	6	4		2.2	15	15	
		0.8	7	5		50°	1.6	11	9
		0.8	5	4		1.6	12	8	
	média	0.80	6.00	4.33		média	1.80	12.67	10.67
	desvio	0.00	1.00	0.58		desvio	0.35	2.08	3.79
	incerteza	0.00	0.58	0.33		0.20	1.20	2.19	
70°	0.8	4	3	2.6	20	15			
	0.8	5	4	70°	1.4	13	9		
	0.7	5	4	1.2	10	8			
média	0.77	4.67	3.67	média	1.73	14.33	10.67		
desvio	0.06	0.58	0.58	desvio	0.76	5.13	3.79		
incerteza	0.03	0.33	0.33	0.44	2.96	2.19			

Tabela A3-3: Resumo das dimensões avaliadas

		amostra 3	amostra 9	amostra 16	amostra 22	amostra 29	média	desvio	incerteza	amostras	
P20	30°	altura	58.52	58.57	58.55	58.58	58.47	58.54	0.044	0.02	5
		Dia. menor	58.81	59.11	59.27	59.28	59.23	59.14	0.195	0.09	5
		Dia. maior	62.35	62.21	62.53	62.40	62.52	62.40	0.133	0.06	5
		espessura	1.47	1.46	1.48	1.44	1.45	1.46	0.016	0.01	5
	50°	altura	58.55	58.44	58.48	58.42	58.58	58.49	0.071	0.03	5
		Dia. menor	59.58	59.56	59.40	59.22	59.46	59.44	0.143	0.06	5
		Dia. maior	62.05	62.10	62.08	62.20	62.34	62.15	0.119	0.05	5
		espessura	1.44	1.44	1.41	1.45	1.44	1.44	0.015	0.01	5
	70°	altura	58.39	58.57	58.30	58.43	58.28	58.39	0.115	0.05	5
		Dia. menor	59.20	59.21	59.18	59.10	59.24	59.19	0.054	0.02	5
		Dia. maior	62.02	62.11	62.10	62.08	62.12	62.09	0.041	0.02	5
		espessura	1.45	1.46	1.43	1.45	1.42	1.44	0.014	0.01	5
Al	30°	altura	58.45	58.55	58.56	58.50	58.56	58.52	0.048	0.02	5
		Dia. menor	59.47	59.34	59.37	59.42	59.43	59.41	0.050	0.02	5
		Dia. maior	62.21	62.25	62.54	62.56	62.36	62.38	0.162	0.07	5
		espessura	1.43	1.42	1.44	1.45	1.40	1.43	0.020	0.01	5
	50°	altura	58.59	58.62	58.58	58.65	58.66	58.62	0.036	0.02	5
		Dia. menor	59.36	59.36	59.29	59.33	59.33	59.34	0.029	0.01	5
		Dia. maior	62.46	62.29	62.34	62.28	62.33	62.34	0.071	0.03	5
		espessura	1.43	1.45	1.46	1.43	1.45	1.45	0.011	0.01	5
	70°	altura	58.36	58.51	58.53	58.44	58.40	58.45	0.070	0.03	5
		Dia. menor	59.87	59.73	59.64	59.19	59.36	59.56	0.276	0.12	5
		Dia. maior	62.47	62.91	62.40	62.22	62.42	62.49	0.256	0.11	5
		espessura	1.37	1.44	1.44	1.43	1.44	1.42	0.032	0.01	5
Zamak	30°	altura	58.71	58.75	58.71	58.84	58.69	58.74	0.060	0.03	5
		Dia. menor	59.34	59.36	59.37	59.32	59.40	59.36	0.032	0.01	5
		Dia. maior	62.43	62.44	62.52	62.55	62.45	62.48	0.056	0.03	5
		espessura	1.45	1.46	1.47	1.45	1.45	1.46	0.008	0.00	5
	50°	altura	58.70	58.62	58.59	58.61	58.63	58.63	0.043	0.02	5
		Dia. menor	59.56	59.60	59.84	59.79	59.69	59.70	0.121	0.05	5
		Dia. maior	62.38	62.62	62.71	62.52	62.42	62.53	0.137	0.06	5
		espessura	1.40	1.42	1.38	1.43	1.45	1.41	0.027	0.01	5
	70°	altura	58.28	58.25	58.28	58.34	58.25	58.28	0.038	0.02	5
		Dia. menor	59.18	59.14	59.13	59.24	59.16	59.17	0.043	0.02	5
		Dia. maior	62.32	62.56	62.43	62.39	62.24	62.39	0.121	0.05	5
		espessura	1.43	1.44	1.42	1.42	1.42	1.43	0.008	0.00	5
Resina	30°	altura	58.53	58.70	58.60	58.67	58.71	58.64	0.077	0.03	5
		Dia. menor	58.81	59.06	58.90	58.58	58.90	58.85	0.177	0.08	5
		Dia. maior	62.01	62.02	62.07	62.21	62.02	62.07	0.084	0.04	5
		espessura	1.51	1.51	1.46	1.48	1.50	1.49	0.020	0.01	5
	50°	altura	58.73	58.70	58.79	58.71	58.67	58.72	0.044	0.02	5
		Dia. menor	58.70	58.85	59.06	58.67	58.74	58.80	0.160	0.07	5
		Dia. maior	62.21	62.14	62.36	62.31	62.16	62.23	0.094	0.04	5
		espessura	1.49	1.44	1.50	1.49	1.50	1.48	0.023	0.01	5
	70°	altura	58.87	58.92	58.89	58.90	58.76	58.87	0.062	0.03	5
		Dia. menor	59.13	59.08	59.25	59.08	59.05	59.12	0.079	0.04	5
		Dia. maior	62.27	62.41	62.42	62.38	62.37	62.37	0.058	0.03	5
		espessura	1.47	1.45	1.48	1.46	1.49	1.47	0.017	0.01	5

Tabela A3-6: Dimensões das amostras injetadas a 70°C

P20	amostra 3			D	e	Zamak	amostra 3			D	e	Resina	amostra 3			D	e
	altura	d	altura				d	altura	d				altura	d	altura		
M	1	58.43	59.39	62.18	1.55	M	1	58.28	59.07	62.25	1.35	M	1	58.84	59.21	61.75	1.51
	2	58.19	58.79	61.88	1.32		2	58.29	59.20	62.37	1.47		2	58.94	59.09	62.85	1.49
	3	58.54	59.43	61.99	1.47		3	58.26	59.26	62.35	1.48		3	58.83	59.10	62.22	1.42
M		58.39	59.20	62.02	1.45		M		58.28	59.18	62.32	1.43		58.87	59.13	62.27	1.47
M	amostra 9			D	e	M	amostra 9			D	e	M	amostra 9			D	e
	altura	d	altura				d	altura	d				altura	d			
	1	58.68	59.27				62.06	1.40	1				58.26	59.16	62.44		
2	58.16	58.88	62.06	1.49	2	58.28	59.03	62.73	1.40	2	58.95	58.94	62.38	1.41			
3	58.87	59.47	62.20	1.48	3	58.22	59.22	62.52	1.42	3	59.01	59.27	62.42	1.49			
M		58.57	59.21	62.11	1.46		M		58.25	59.14	62.56	1.44		58.92	59.08	62.41	1.45
M	amostra 16			D	e	M	amostra 16			D	e	M	amostra 16			D	e
	altura	d	altura				d	altura	d				altura	d			
	1	58.60	59.75				62.95	1.46	1				58.30	59.02	62.33		
2	58.14	59.28	62.11	1.40	2	58.21	59.15	62.64	1.36	2	58.83	59.14	62.30	1.43			
3	58.16	59.28	62.11	1.52	3	58.32	59.21	62.33	1.44	3	58.88	59.57	62.27	1.53			
M		58.30	59.18	62.10	1.43		M		58.28	59.13	62.43	1.42		58.89	59.25	62.42	1.48
M	amostra 22			D	e	M	amostra 22			D	e	M	amostra 22			D	e
	altura	d	altura				d	altura	d				altura	d			
	1	58.59	59.44				61.97	1.48	1				58.40	59.21	62.52		
2	58.15	58.70	62.26	1.44	2	58.27	59.29	62.30	1.43	2	58.87	59.05	62.25	1.50			
3	58.54	59.15	62.02	1.42	3	58.36	59.21	62.35	1.43	3	58.99	59.12	62.29	1.51			
M		58.43	59.10	62.08	1.45		M		58.34	59.24	62.39	1.42		58.90	59.08	62.38	1.46
M	amostra 29			D	e	M	amostra 29			D	e	M	amostra 29			D	e
	altura	d	altura				d	altura	d				altura	d			
	1	58.46	58.94				61.97	1.41	1				58.24	59.10	62.35		
2	58.15	59.40	62.20	1.46	2	58.23	59.19	62.05	1.42	2	58.69	59.16	62.44	1.46			
3	58.24	59.38	62.20	1.39	3	58.28	59.20	62.32	1.43	3	58.76	59.32	62.30	1.45			
M		58.28	59.24	62.12	1.42		M		58.25	59.16	62.24	1.42		58.76	59.05	62.37	1.49

Tabela A3-7: Contração das amostras

60		63	
Altura		D. Maior	
Configuração	Percentual de contração	Configuração	Percentual de contração
AISI P20 - 30°	2.43%	AISI P20 - 30°	0.95%
AISI P20 - 50°	2.52%	AISI P20 - 50°	1.35%
AISI P20 - 70°	2.68%	AISI P20 - 70°	1.44%
Alumínio - 30°	2.47%	Alumínio - 30°	0.98%
Alumínio - 50°	2.30%	Alumínio - 50°	1.05%
Alumínio - 70°	2.28%	Alumínio - 70°	0.81%
Zamak - 30°	2.27%	Zamak - 30°	1.48%
Zamak - 50°	2.13%	Zamak - 50°	1.22%
Zamak - 70°	2.13%	Zamak - 70°	0.83%
Resina - 30°	2.27%	Resina - 30°	0.75%
Resina - 50°	2.13%	Resina - 50°	0.97%
Resina - 70°	1.88%	Resina - 70°	1.48%
			1.22%
			1.00%

60		1.5	
D. Menor		Espessura	
Configuração	Percentual de contração	Configuração	Percentual de contração
AISI P20 - 30°	1.43%	AISI P20 - 30°	2.67%
AISI P20 - 50°	0.93%	AISI P20 - 50°	4.00%
AISI P20 - 70°	1.35%	AISI P20 - 70°	4.00%
Alumínio - 30°	0.98%	Alumínio - 30°	4.67%
Alumínio - 50°	1.10%	Alumínio - 50°	3.33%
Alumínio - 70°	0.50%	Alumínio - 70°	5.33%
Zamak - 30°	1.07%	Zamak - 30°	2.67%
Zamak - 50°	0.50%	Zamak - 50°	6.00%
Zamak - 70°	1.38%	Zamak - 70°	4.67%
Resina - 30°	1.92%	Resina - 30°	0.67%
Resina - 50°	2.00%	Resina - 50°	1.33%
Resina - 70°	1.47%	Resina - 70°	2.00%

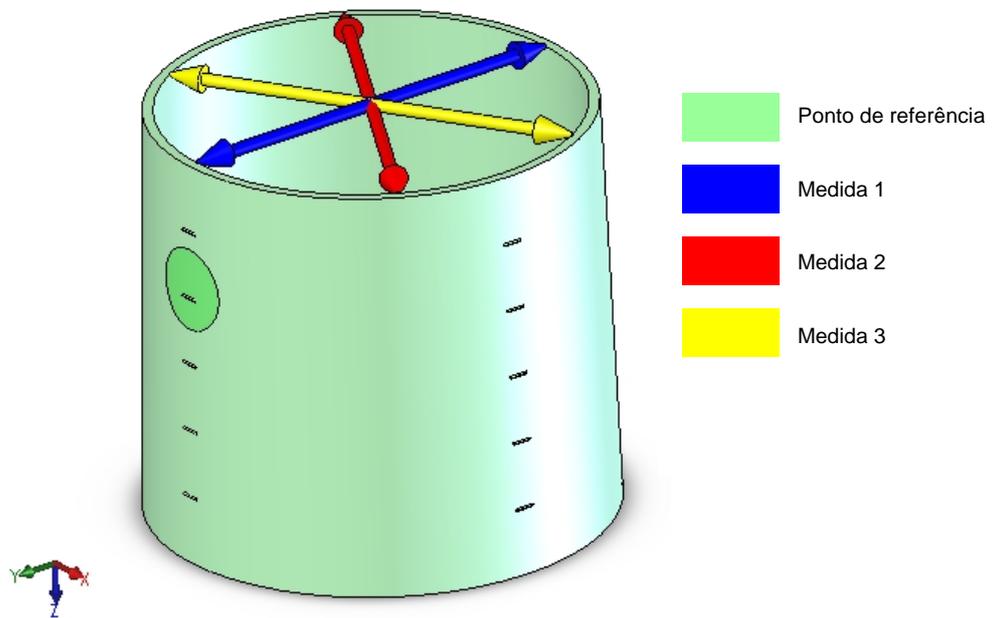


Figura A3-1: Posição de coleta das medidas do Diâmetro de 60mm

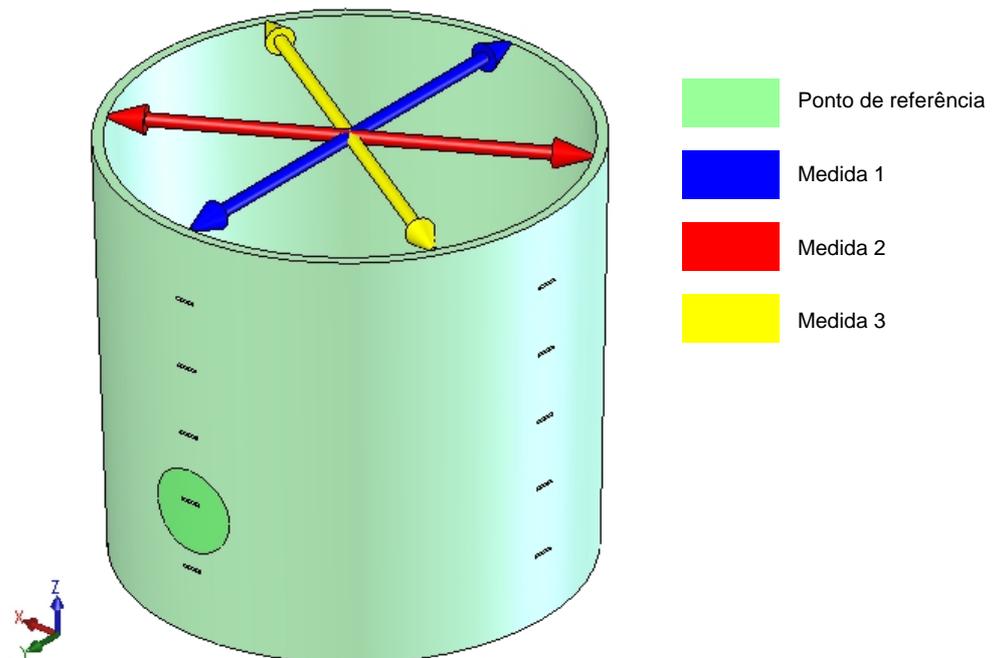


Figura A3-2: Posição de coleta das medidas do Diâmetro de 63mm

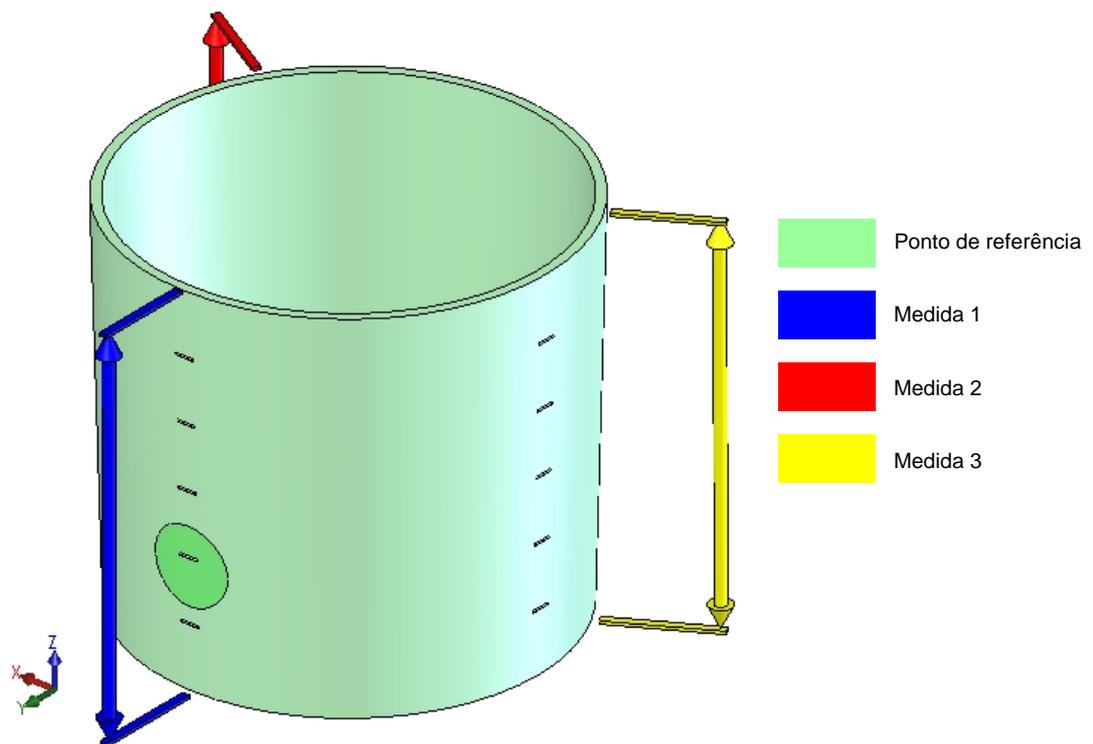


Figura A3-3: Posição de coleta das medidas da Altura de 60mm

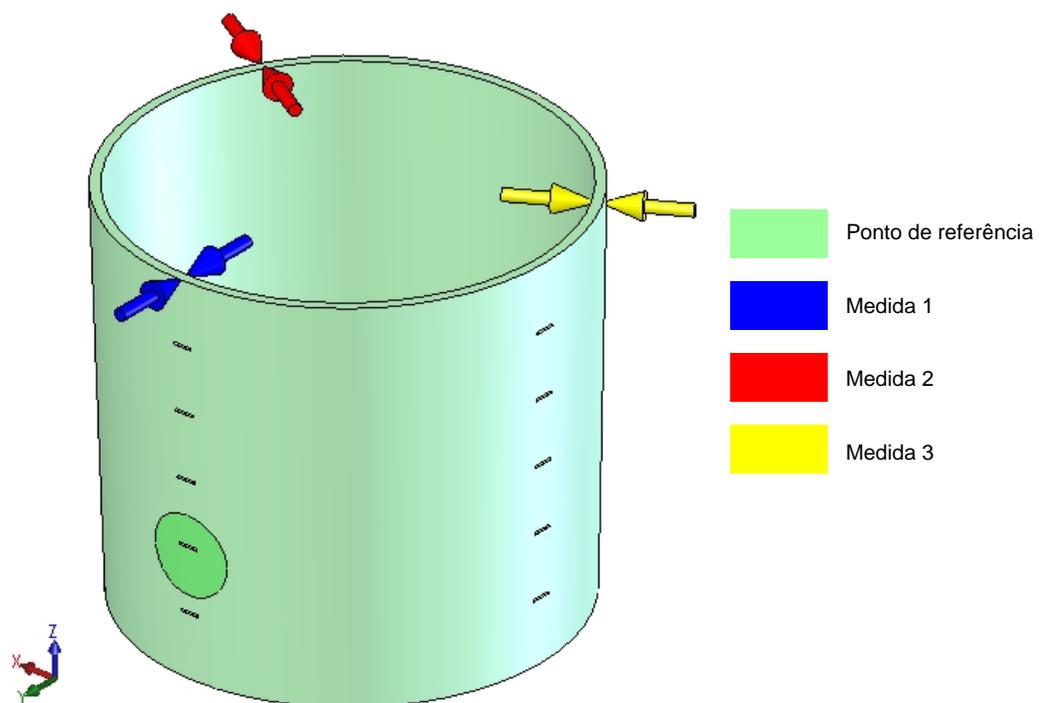


Figura A3-4: Posição de coleta das medidas da espessura de 1,50mm

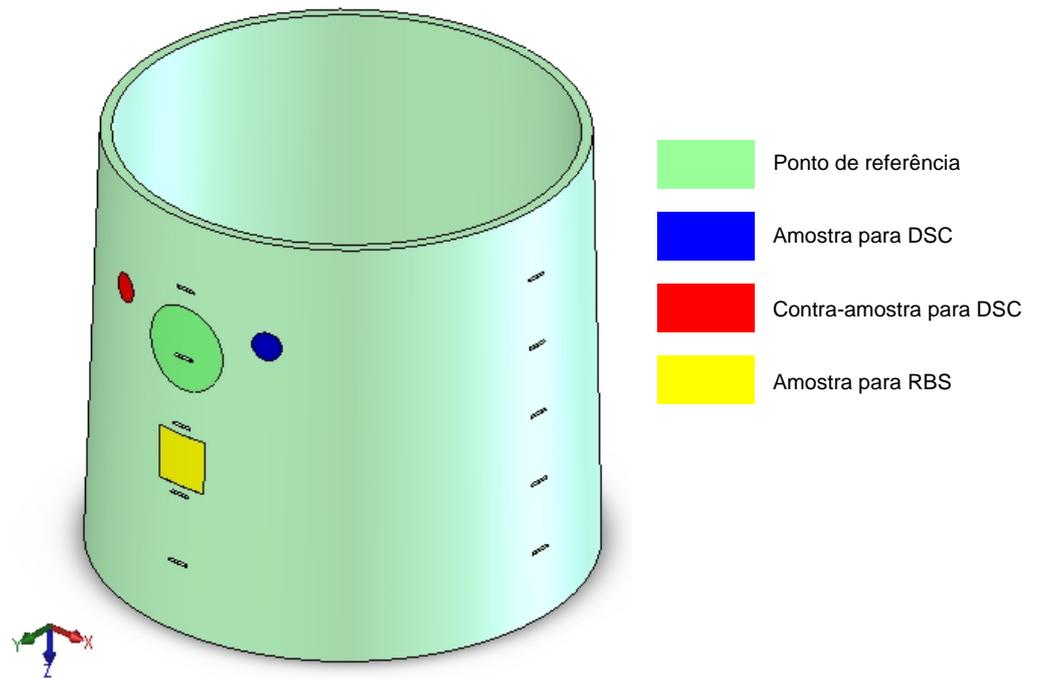


Figura A3-5: Posição de coleta das amostras de DSC e RBS

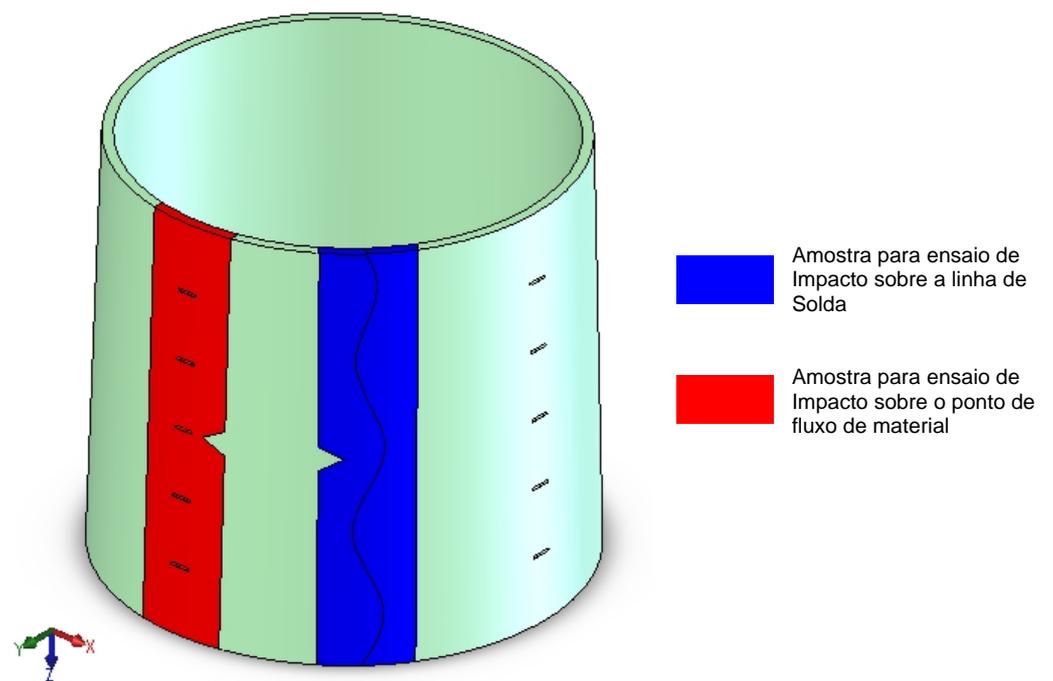


Figura A3-6: Posição de coleta das amostras para o ensaio de impacto.

ANEXO 4

ENSAIO DE DSC

Figura A4-1: Termograma de DSC - AISI P20 – 30°C.

Figura A4-2: Termograma de DSC - AISI P20 – 50°C.

Figura A4-3: Termograma de DSC - AISI P20 – 70°C.

Figura A4-4: Termograma de DSC - Resina – 30°C.

Figura A4-5: Termograma de DSC - Resina – 50°C.

Figura A4-6: Termograma de DSC - Resina – 70°C.

Figura A4-7: Termograma de DSC - Alumínio – 30°C.

Figura A4-8: Termograma de DSC - Alumínio – 50°C.

Figura A4-9: Termograma de DSC - Alumínio – 70°C.

Figura A4-10: Termograma de DSC - Zamak – 30°C.

Figura A4-11: Termograma de DSC - Zamak – 50°C.

Figura A4-12: Termograma de DSC - Zamak – 70°C.

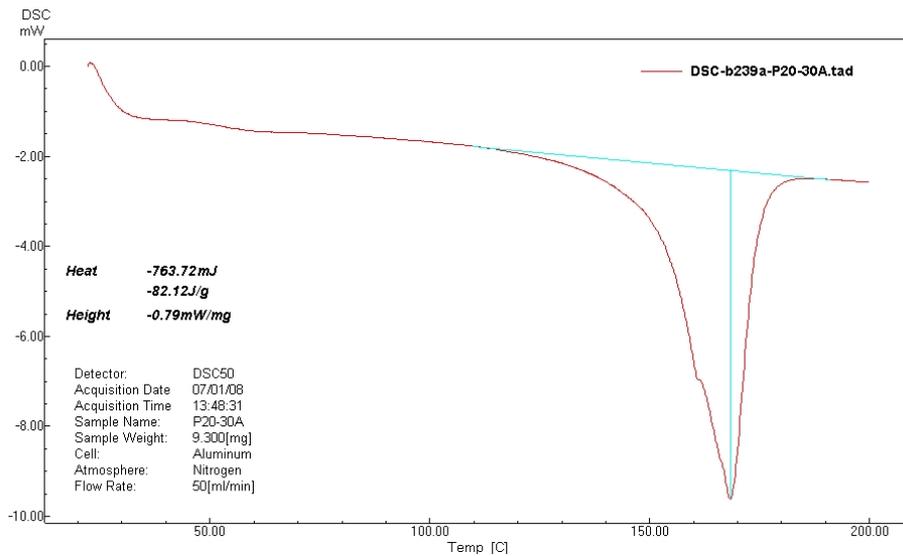


Figura A4-1: Termograma de DSC - AISI P20 – 30°C.

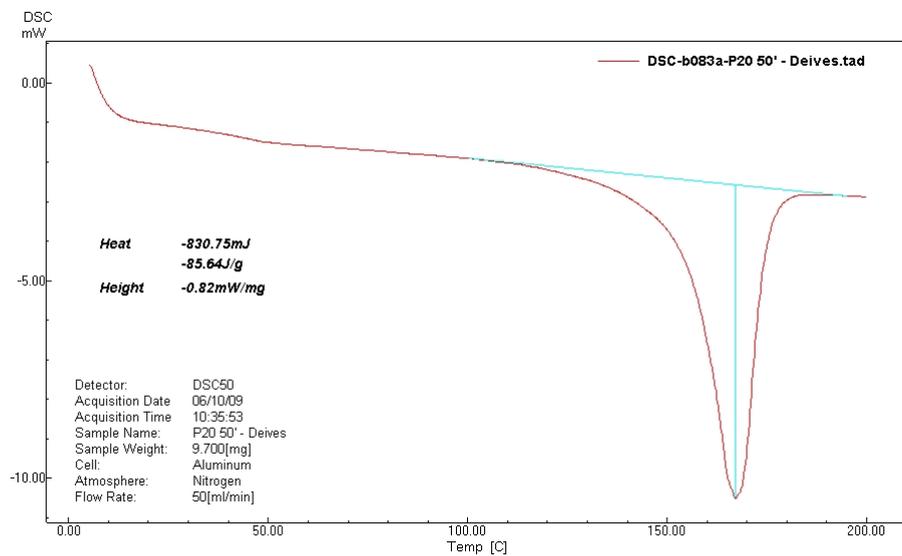


Figura A4-2: Termograma de DSC - AISI P20 – 50°C.

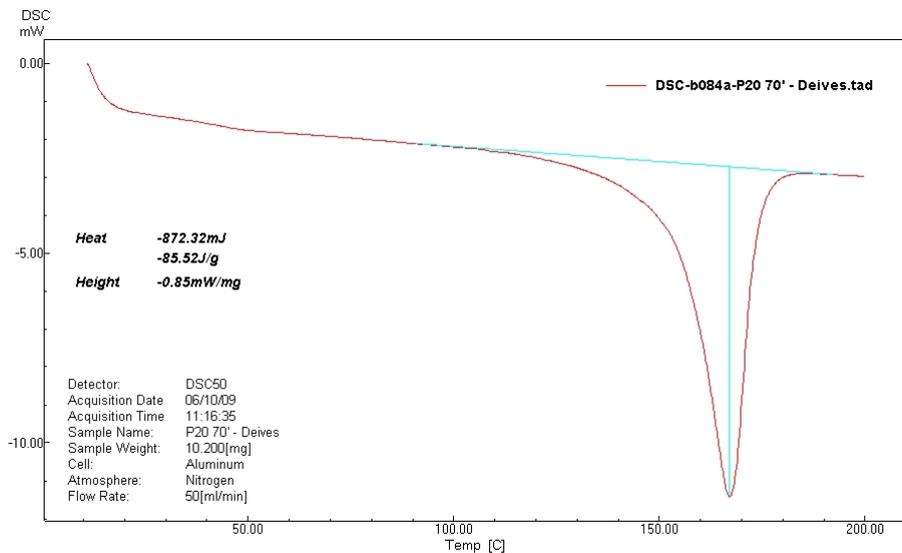


Figura A4-3: Termograma de DSC - AISI P20 – 70°C.

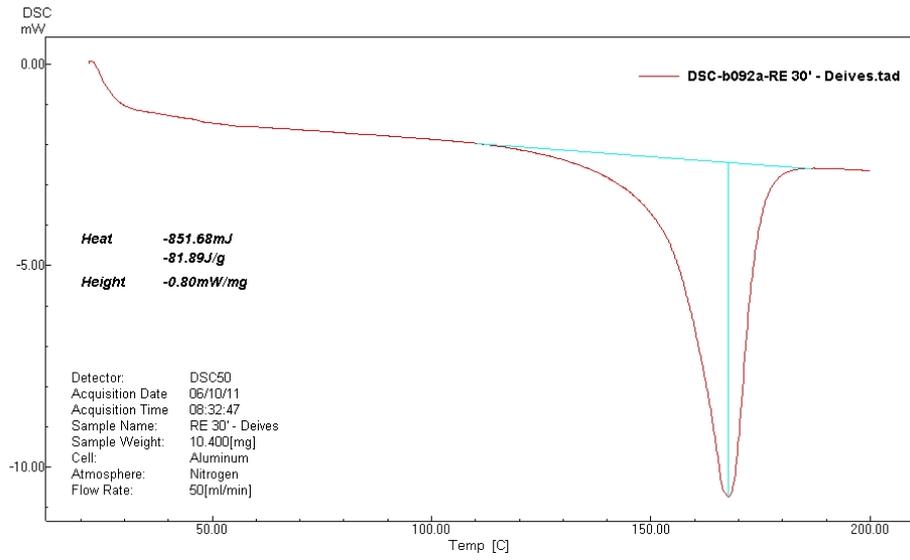


Figura A4-4: Termograma de DSC - Resina – 30°C.

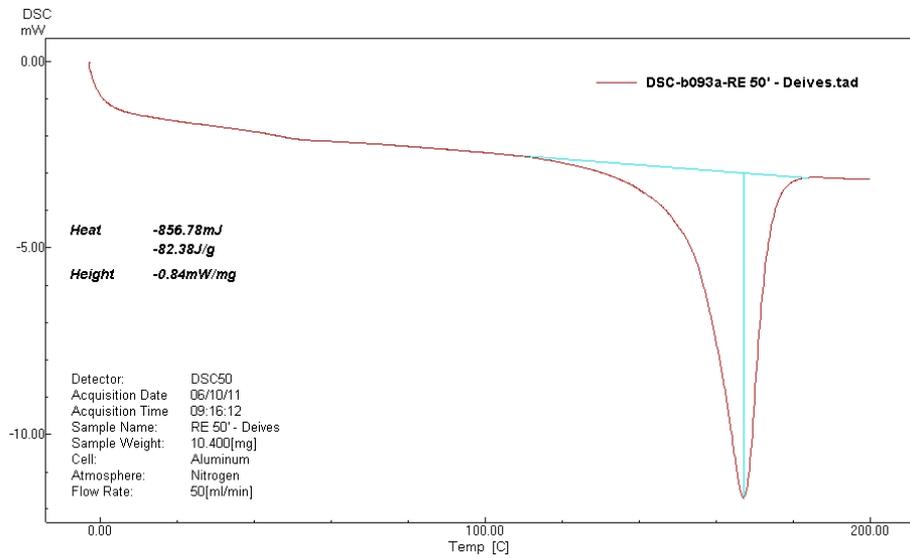


Figura A4-5: Termograma de DSC - Resina – 50°C.

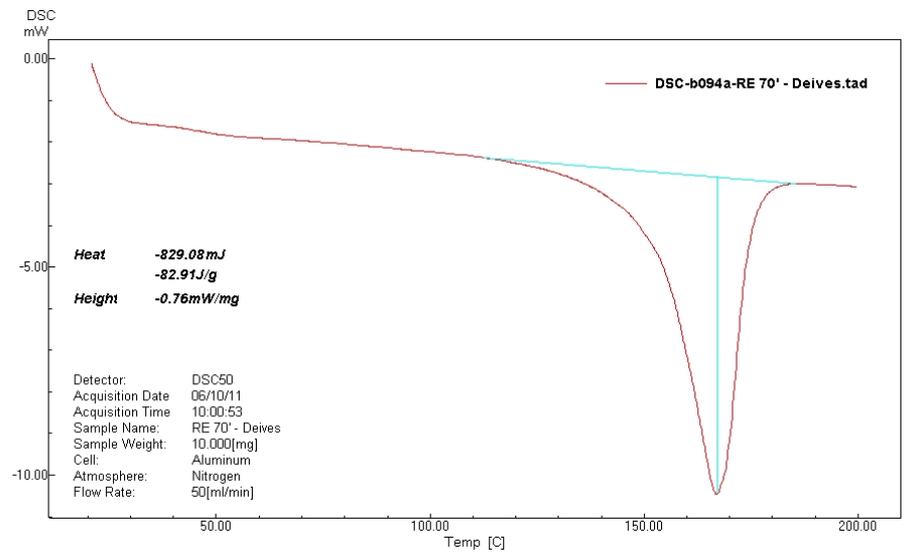


Figura A4-6: Termograma de DSC - Resina – 70°C.

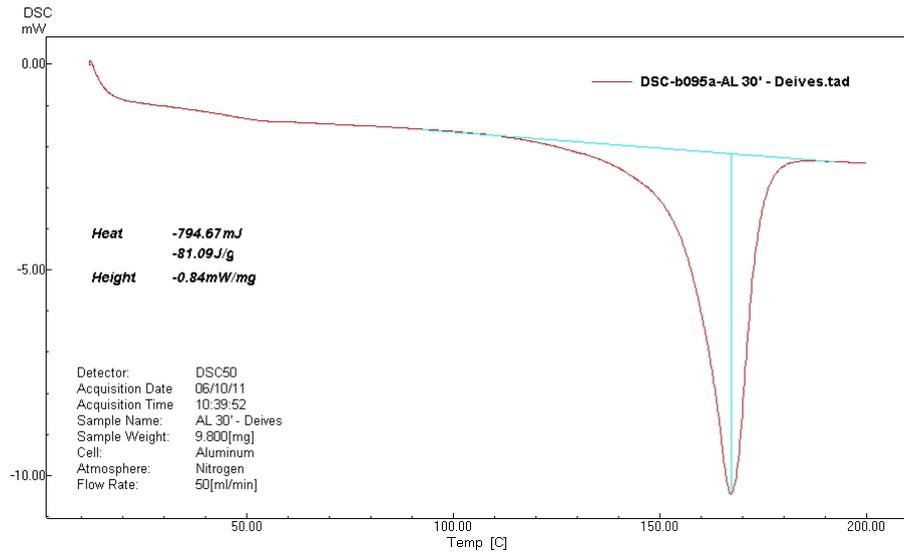


Figura A4-7: Termograma de DSC - Alumínio – 30°C.

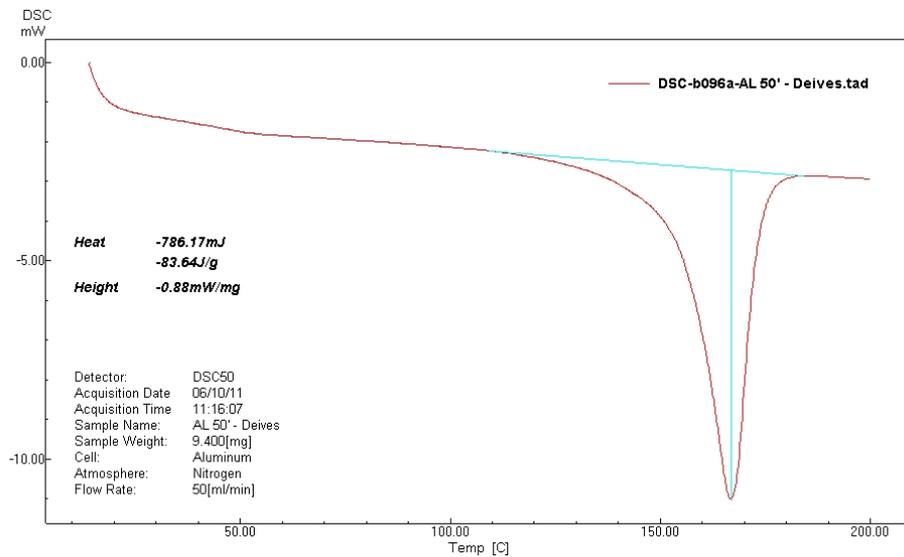


Figura A4-8: Termograma de DSC - Alumínio – 50°C.

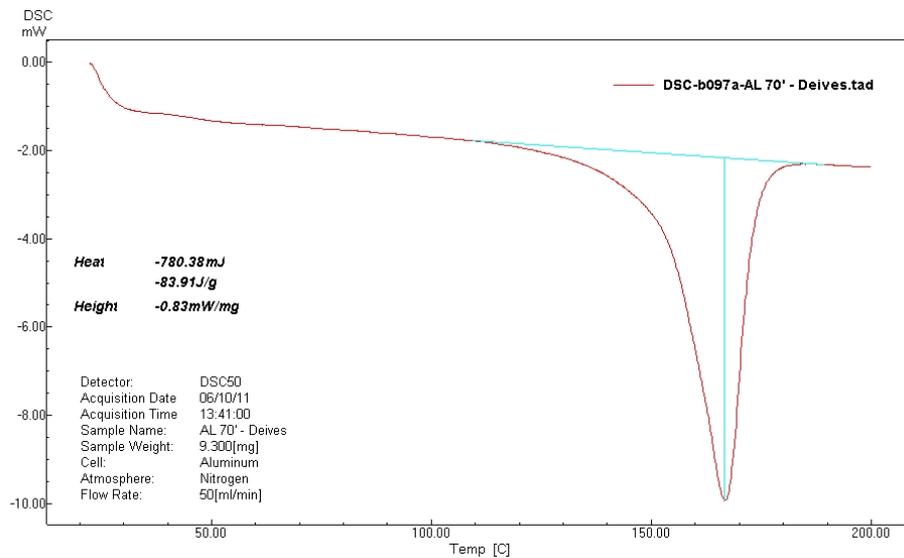


Figura A4-9: Termograma de DSC - Alumínio – 70°C.

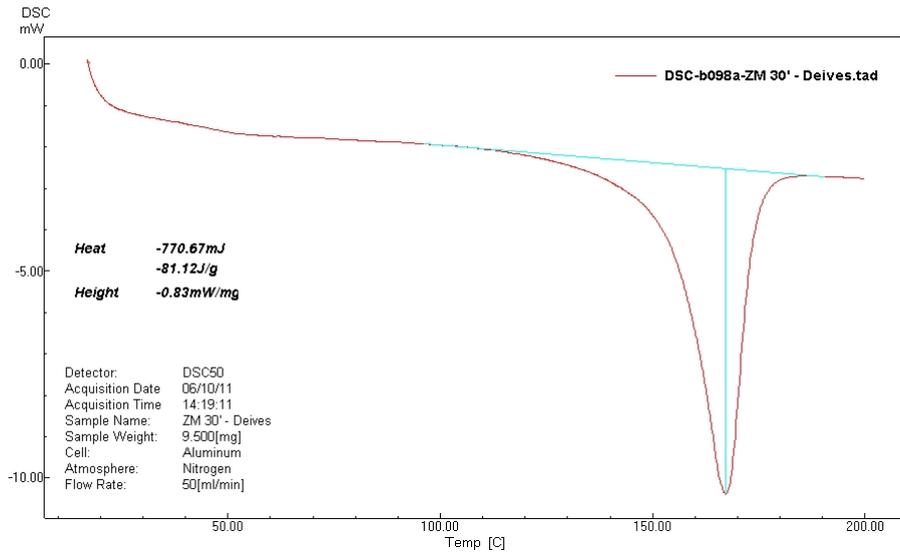


Figura A4-10: Termograma de DSC - Zamak – 30°C.

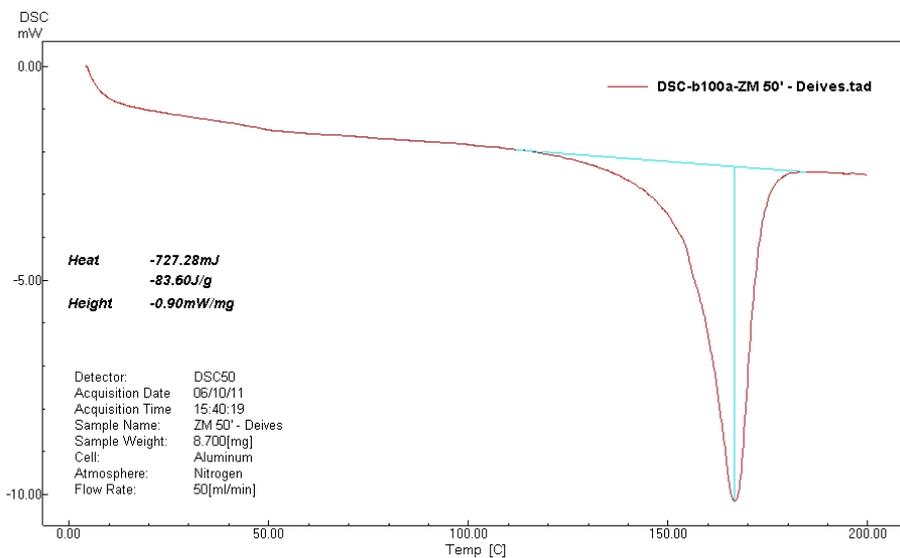


Figura A4-11: Termograma de DSC - Zamak – 50°C.

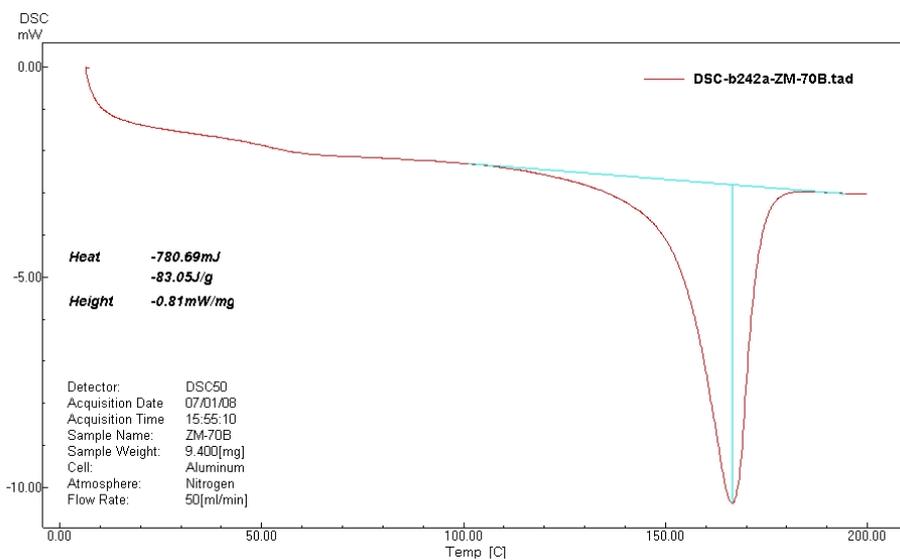


Figura A4-12: Termograma de DSC - Zamak – 70°C.