

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS - PPGEM**

ISMAEL GRYZINSKI

**APLICAÇÃO DE ZAMAC-8 EM MOLDE-PROTÓTIPO
USINADO E ANÁLISE DO MOLDADO EM
POLIPROPILENO**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
OUTUBRO - 2011**

ISMAEL GRYZINSKI

APLICAÇÃO DE ZAMAC-8 EM MOLDE-PROTÓTIPO USINADO E ANÁLISE DO MOLDADO EM POLIPROPILENO

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, da Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. Neri Volpato, PhD.

CURITIBA

OUTUBRO - 2011

TERMO DE APROVAÇÃO

ISMAEL GRYZINSKI

**APLICAÇÃO DE ZAMAC-8 EM MOLDE-PROTÓTIPO
USINADO E ANÁLISE DO MOLDADO EM
POLIPROPILENO**

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr.
Coordenador de Curso

Banca Examinadora

Prof. Carlos Alberto Costa, PhD.
UCS

Prof. José Aguiomar Foggiatto, Dr.
UTFPR

Prof. Paulo André de C. Beltrão, PhD.
UTFPR

Prof. Neri Volpato, PhD.
UTFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2011

Aos meus pais: José e Anita, dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Neri Volpato, PhD., pela dedicação e paciência com seu neófito e ainda por albergar-me com uma primitiva idéia, transformando-a em um estudo científico;

Ao Prof. Carlos Cruz, DSc., Departamento de Química da UTFPR, pelo apoio e esclarecimentos aos ensaios físicos propostos;

À Profa. Dra. Elaine Azevedo, Departamento de Física da UTFPR, pelo apoio e esclarecimentos aos ensaios físicos propostos e por gentilmente abrir as portas da USP-São Carlos para este estudo;

Ao Prof. Dr. Eduardo Mauro do Nascimento, Departamento de Mecânica da UTFPR, na área de Materiais, pelo apoio, discussão e esclarecimentos quanto aos resultados dos ensaios mecânicos propostos;

Agradeço as instituições de ensino públicas UTFPR e USP – São Carlos, pela acolhida e liberdade de ação em seus laboratórios.

Ao bolsista Ramon Eduardo Gadens Baduy e ao estagiário Julio Henrique Wolff Antônio, ambos graduandos da UTFPR, pelo apoio nas tarefas de fabrico do molde e injeção dos corpos de prova deste estudo;

À gerência de pós-graduação em engenharia mecânica da UTFPR, por cuidar dos aspectos legais de minha permanência em seu âmbito. Atividade, que de tão discreta, passa-nos despercebida;

Ao NUFER, Núcleo de Prototipagem e Ferramental, da UTFPR, por ceder parte de seus recursos humanos, para a realização desta tarefa;

Ao Laboratório de Processamento de Polímeros, da UTFPR, por ceder parte de seus recursos humanos e materiais para a realização desta tarefa;

A Tecpron e Coretec System pela doação do software Moldex3D à UTFPR.

A todos, em mais elevada estima, os meus sinceros agradecimentos.

"A arqueologia contempla todas as áreas, exceto em relação as artes e processos de fabricação; Estamos mais conscientes dos detalhes de civilizações egípcia e babilônica que as origens de nossas indústrias. Há cadeiras para todas as histórias, exceto para as aplicações técnicas da ciência."

Anatole Mallet, 1908.

GRYZINSKI, Ismael, **Aplicação de Zamac-8 em Molde-Protótipo Usinado e Análise do Moldado em Polipropileno**, 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

RESUMO

A razão da existência de um molde-protótipo é de se obter rapidamente um injetado com o mesmo material e utilizando o mesmo processo de fabricação do produto final, com baixo custo. Seus injetados podem servir como protótipos, lotes pilotos, pré-séries ou ainda cobrirem a necessidade de uma baixa demanda de produto ou de pequenos lotes. Critérios de manufaturabilidade e de qualidades mecânicas são importantes na fabricação do molde-protótipo. Entretanto, além destes critérios, este molde deve ser capaz de produzir um injetado com qualidade semelhante ao produto injetado em um molde convencional. Observa-se, no entanto, que são escassos os estudos referentes à utilização de material alternativo para molde-protótipo e a influência deste material no produto injetado. Desta forma, o objetivo principal deste estudo é caracterizar um molde-protótipo usinado em liga de zinco (zamac-8), através da análise das propriedades físicas (Microscopia Eletrônica de Varredura com Energia Dispersiva de Raio-X, MEV-EDS) e mecânicas (Ensaio de Tração e Flexão) do polipropileno (PP) injetado nesta ferramenta e compará-lo ao injetado em aço. Os resultados demonstram que o PP injetado em zamac-8 possui características similares ao moldado em aço, sem apresentar contaminação. Assim, este material pode ser recomendado para esta finalidade.

Palavras-chave: Molde-Protótipo, Injeção de Baixa Tiragem, Protótipos, Zamac-8, Liga de Zinco.

GRYZINSKI, Ismael, **Aplicação de Zamac-8 em Molde-Protótipo Usinado e Análise do Moldado em Polipropileno**, 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ABSTRACT

The reason for the existence of a prototype mold is to obtain a quickly injected with the same material and using the same manufacturing process of the final product with low cost. Their models can serve as prototypes, pilot batches, pre-series or the need to cover a lower demand for products or small batches. Criteria for manufacturability and mechanical qualities are important in the manufacture of prototype mold, but these criteria are only valid if this mold is capable of producing injected with a similar quality to the product injected into a conventional mold. However, there are few studies concerning the use of alternative material for prototype mold and the influence of that material into the product injected. Thus, the main objective of this study is to characterize a prototype mold machined in zinc alloy (Zamak-8), by analyzing the physical properties and mechanical properties of the polypropylene (PP) injected into this tool and compare it injected into the steel. The results show that the PP injected into zamac-8 has characteristics similar to the injected in steel mold, without contamination. Thus, this material can be recommended for the purpose for injection mold

Keywords: Prototype Mold, Short-Run Injection, Prototypes, Zamak-8, Zinc Alloy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Morfologia dos polímeros.....	8
Figura 2.2 - Diagrama tensão/deformação de polímeros	9
Figura 2.3 - Efeito escada	19
Figura 2.4 - Diagrama de fases do zinco.....	28
Figura 2.5 - Microestrutura do zamac.....	29
Figura 2.6 - Pontos de medição do moldado em resina	30
Figura 2.7 - Diagrama tensão/deformação do PP moldado em compósito	32
Figura 2.8 - Diagrama tensão/deformação do PP moldado em molde de aço	32
Figura 2.9 - Diagrama tensão/deformação do PP moldado em ABS	33
Figura 2.10 - Pontos de medição no moldado em alumínio	35
Figura 3.1 - Fluxograma do estudo	38
Figura 3.2 - Blanque de zamac-8 fundido.....	42
Figura 3.3 - Corpo de prova de tração.....	44
Figura 3.4 - Modelo em CAD dos corpos de prova	46
Figura 3.5 - Modelo em CAD dos insertos.....	47
Figura 3.6 - Modelo em CAD das cavidades	48
Figura 3.7 - Programação Powermill do macho	51
Figura 3.8 - Programação Powermill das cavidades	52
Figura 3.9 - Programação Powermill da chave seletora.....	53
Figura 3.10 - Fundição do cavacos	56
Figura 4.1 - Micrografia do zamac-8 como recebido	61
Figura 4.2 - Micrografia do zamac-8 temperado.....	61
Figura 4.3 - Vazios surgidos na usinagem	62
Figura 4.4 - Amostra da fundição dos cavacos	63

Figura 4.5 - Tempo de preenchimento da cavidade	65
Figura 4.6 - Linha de solda no moldado	65
Figura 4.7 - Aprisionamento de gases dentro das cavidades.....	66
Figura 4.8 - Moldado extraído.....	73
Figura 4.9 - Micrografia MEV do moldado em zamac-8	73
Figura 4.10 - Análise EDS do moldado em zamac-8.....	74
Figura 4.11 - Micrografia MEV de inclusão metálica, moldado em zamac-8.....	74
Figura 4.12 - Análise EDS de inclusão metálica, moldado em zamac-8	75
Figura 4.13 - Micrografia MEV de inclusão metálica, moldado em aço 1045.....	75
Figura 4.14 - Análise EDS de inclusão metálica, moldado em aço 1045	76
Figura 4.15 - Gráfico DSC.....	77
Figura 4.16 - Curva tensão/deformação dos ensaios de tração	78
Figura 4.17 - Curva tensão/deformação dos ensaios de flexão	80
Figura 4.18 - Curva tensão/deformação dos ensaios de flexão a 5%	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Acabamento ISO de superfícies para moldes	19
Tabela 2.2 - Comparação de rugosidades em moldes CNC e RT	20
Tabela 2.3 - Comparação de CNC com RT	21
Tabela 2.4 - Indicação de uso do aço carbono para moldes-protótipos	25
Tabela 2.5 - Comparação de ligas de alumínio e zinco.....	27
Tabela 2.6 - Erros dimensionais do moldado em resina	31
Tabela 2.7 - Erros dimensionais do moldado em alumínio.....	35
Tabela 3.1- Comparação de materiais metálicos	39
Tabela 3.2 - Comparação físico-mecânica de zamac-5 e 8	40
Tabela 3.3 - Características mecânicas do aço 1045.....	41
Tabela 3.4 - Medidas e tolerâncias do corpo de prova para tração.....	44
Tabela 3.5 - Parâmetros de injeção pelo Moldex3D.....	49
Tabela 3.6 - Lista de ferramentas utilizadas.....	50
Tabela 3.7 - Parâmetros de corte e desbaste	54
Tabela 4.1 - Comparação de durezas do zamac-8	60
Tabela 4.2 - Rugosidade média do zamac-8 polido	63
Tabela 4.3 - Tempos de usinagem, ajustes e acabamentos	66
Tabela 4.4 - Parâmetros de injeção para molde em aço 1045.....	67
Tabela 4.5 - Parâmetros de injeção para molde em zamac-8.....	68
Tabela 4.6 - Medidas dos moldados em aço e zamac (tração).....	70
Tabela 4.7 - Média das medidas e desvios padrões de tração	70
Tabela 4.8 - Medidas dos moldados em aço e zamac (flexão)	71
Tabela 4.9 - Média das medidas e desvios padrões de flexão.....	71

Tabela 4.10 - Dispersão das medidas em tração72

Tabela 4.11- Dispersão das medidas em flexão72

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1 - Cálculo do módulo de elasticidade.....	78
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	- Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CAD	- Projeto Auxiliado por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
CNC	- Comando Numérico Computadorizado
DIN	- Instituto Alemão para Normatização (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
DMA	- Análise Dinâmico-Mecânica (<i>Dynamic Mechanical Analysis</i>)
DSC	- Calorimetria Exploratória Diferencial (<i>Differential scanning calorimetry</i>)
EDM	- Usinagem por Descarga Elétrica (<i>Electrical Discharge Machinig</i>)
EDS	- Detector de Energia Dispersiva de Raios-X (<i>Energy Dispersive x-ray Detector</i>)
HB	- Dureza Brinell (<i>Hardnes Brinell</i>)
HSM	- Usinagem de Alta Velocidade (<i>High Speed Machining</i>)
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
NC	- Controle Numérico (<i>Numeric Control</i>)
RBS	- Espectropia de Espalhamento Posterior Rutherford (<i>Rutherford Backscattering Spectroscopy</i>)
RP	- Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
RT	- Ferramental Rápido (<i>Rapid Tooling</i>)
SPI	- Sociedade das Indústrias de Plásticos (<i>Society of the Plastics Industry</i>)
Tg	- Temperatura de Transição Vítea (<i>Glass Transition Temperature</i>)

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Identificação da Oportunidade.....	3
1.2 Objetivo Geral	3
1.3 Objetivos Específicos	4
1.4 Justificativa.....	4
1.5 Organização do Trabalho.....	5
2 MOLDES-PROTÓTIPO E SUA INFLUÊNCIA NO MOLDADO	7
2.1 Processo de Injeção e Seus Requisitos	7
2.1.1 Características básicas dos polímeros	7
2.1.2 Propriedades mecânicas dos polímeros.....	9
2.1.3 Característica e processamento do polipropileno (PP).....	10
2.2 Ensaio Mecânicos.....	12
2.2.1 Ensaio de tração.....	13
2.2.2 Ensaio de flexão.....	13
2.3 Ensaio Físicos	14
2.3.1 Análise de MEV com EDS	14
2.3.2 Análise de DSC	14
2.4 Processo de Injeção	15
2.4.1 Exigências mecânicas do processo de injeção	16
2.5 Obtenção de Moldes-Protótipo por Prototipagem Rápida	17
2.6 Vantagens da Obtenção de Moldes-Protótipo por CNC	20
2.7 Materiais Alternativos Usináveis para Moldes-Protótipos.....	21
2.7.1 Resinas	22
2.7.2 Ligas de cobre.....	23
2.7.3 Aço comum ao carbono.....	24
2.7.4 Ligas de alumínio	25
2.7.5 Ligas de zinco	26
2.8 Características da Liga de Zinco Comercializadas como Zamac	27
2.8.1 Microestrutura do zamac	28
2.9 Características do Moldado em Função do Material do Molde.....	29
2.9.1 Moldados em moldes de resina.....	30
2.9.2 Moldados em moldes de aço comum ao carbono	33
2.9.3 Moldados em moldes de ligas de alumínio.....	34
2.9.4 Moldados em moldes de ligas de zinco.....	36
2.10 Janela de Oportunidade	36
3 MATERIAS E MÉTODOS	38

3.1 Escolha do Material de Molde	39
3.1.1 Escolha do zamac-8 como material de molde	39
3.1.2 Escolha do aço 1045 como material de molde	41
3.2 Fundição do Lingote	42
3.3 Projetos das Cavidades para os Moldes-Protótipo	43
3.4 Projeto e Fabricação dos Insertos	45
3.4.1 Projeto em CAD	45
3.4.2 Análise CAE	49
3.4.3 Processo em CAM	50
3.4.4 Usinagem dos insertos	54
3.5 Ensaio de Reciclagem	55
3.6 Injeção dos Corpos de Prova	56
3.7 Ensaio Físico e Mecânicos dos Corpos de Prova	57
3.7.1 Ensaio de flexão	58
3.7.2 Ensaio de tração	58
3.7.3 Análise de MEV-EDS	58
3.7.4 Análise de DSC	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 Resultado da Fundição do Zamac-8	60
4.2 Resultado dos Ensaio de Usinagem do Zamac-8	62
4.3 Resultado da Análise de Reciclagem do Zamac-8	63
4.4 Resultados da Análise CAE	64
4.5 Resultado do Tempo de Obtenção das Ferramentas de Injeção	66
4.6 Resultados dos Ciclos de Injeção	67
4.7 Resultado das Injeções com Parâmetros Cruzados	69
4.8 Resultados da Geometria do Moldado	69
4.9 Análise de MEV com EDS	73
4.10 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	76
4.11 Análise do Comportamento Mecânico dos Moldados	77
4.11.1 Ensaio de tração	78
4.11.2 Ensaio de flexão	79
5 CONCLUSÕES	81
5.1 Considerações Finais	81
5.2 Conclusões	83
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	83
REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

Peças injetadas em polímeros são largamente utilizadas em todos os segmentos industriais e seu uso tem aumentado consideravelmente (MENGES *et al.*, 1999). Nos processos usuais de confecção da ferramenta de injeção, a utilização de material para a obtenção do molde, de maneira geral, se realiza pelo conhecimento e a experiência prévia do projetista do molde (FERREIRA *et al.*, 2003). Esta abordagem é conhecida como projeto por experiência (MALLOY, 1994).

Na indústria, o processo de obtenção do molde por usinagem, caracterizado pela remoção de material, responde a 65% dos custos de obtenção do molde e a matéria-prima respondendo por outros 20% (SANDVICK, 2000). Não só nos custos do molde eles têm forte relação, mas também entre si, pois as características de um influenciam nos parâmetros de outro (OLIVEIRA, 2006). Tratando-se de peças com geometrias complexas, a obtenção de moldes de injeção por usinagem é relativamente cara (WRUBLAK *et al.*, 2009), pelo tempo de máquina (usinagem) requerido. Estes custos deixam o processo de injeção de plástico pouco capaz de atender prontamente as baixas demandas (tiragens), desguarnecendo uma fatia mercadológica disposta a fazer uso das qualidades dos produtos injetados.

No ciclo de desenvolvimento do produto, da percepção da oportunidade até o lançamento do produto, a maior parte de seus custos é determinada na fase de desenvolvimento (PAHL *et al.*, 2007). Estes autores indicam que a retomada de uma etapa do desenvolvimento, por um reconhecimento tardio de um erro em outra etapa, acarreta prejuízo de tempo e dinheiro. Portanto, há a necessidade de se verificar, ainda nas etapas iniciais de desenvolvimento do produto, se as características do produto, atenderão seus requisitos.

O uso de moldes-protótipo, ou moldes de baixa-tiragem, auxiliam, através da injeção de protótipos, na verificação da viabilidade do projeto do molde definitivo (MALLOY, 1994) e na redução de custos do desenvolvimento de um produto moldado. Ainda, a produção destes protótipos não interrompe o andamento do projeto (FILOMENA, 2004), auxiliando a tomada de decisões em todas as fases do ciclo de desenvolvimento do produto. A Sociedade das Indústrias de Plásticos (SPI) indica como moldes de baixa tiragem aqueles com vida útil em injeção entre 1000

até 10.000 ciclos (MALLOY, 1994). Os injetados nestes moldes devem possuir as características do produto final, auxiliando na avaliação do produto pelos clientes (PAHL *et al.*, 2007) e no projeto da ferramenta definitiva pela engenharia (ROZENFELD e FORCELLINI, 2006).

Normalmente, para obtenção de moldes-protótipo, utiliza-se a manufatura aditiva, tecnologia de ferramental rápido (RT – *Rapid Tooling*) e manufatura subtrativa, tecnologia CNC (RADSTOK, 1999).

A RT consiste na obtenção de moldes através de tecnologia de prototipagem rápida (RP- *Rapid Prototyping*). O curto tempo de fabricação da ferramenta é a principal característica dos processos de fabricação de insertos pela tecnologia RT (NAGAHANUMAIH *et al.*, 2007). Além da obtenção de cavidades com formas complexas, há a possibilidade de se prever canais de refrigeração de acordo com a geometria da cavidade, o que não é possível com a tecnologia CNC (VOLPATO *et al.*, 2007). Esta possibilidade permite um resfriamento mais uniforme do moldado, uma diminuição do ciclo de injeção e aumento de produtividade (ILYAS *et al.*, 2010). Entretanto, os moldes obtidos por essa tecnologia, possuem uma qualidade superficial que necessita de acabamento, que normalmente é dado por usinagem (*ibidem*).

De um modo geral, os acabamentos superficiais obtidos por usinagem estão muito próximos do modelo idealizado em CAD. Outros aspectos que a usinagem CNC apresenta de vantajoso em relação a processos RT é a possibilidade de se usinar virtualmente qualquer material num processo CNC e com o advento da usinagem cinco eixos, também há a liberdade de formas (GRIMM, 2004). Ainda, tem-se um menor custo do molde, aliado a um menor tempo de sua obtenção na escalada de produção, já que grandes cavidades tendem a ser obtidos mais rapidamente por remoção (usinagem) que com adição de material (tecnologia RT), segundo Grimm (2004).

Neste processo são obtidas tolerâncias dimensionais mais apertadas e ainda podem-se escolher materiais menos sensíveis às influências externas, tais como a umidade, temperatura ambiente e idade do material. Como a tecnologia CNC encontra-se comercializada desde 1957 (ARNOLD, 2001), já apresenta uma concepção bem amadurecida, disseminada e que a torna confiável.

Com uso de materiais usináveis alternativos ao aço alta-liga, tais como resinas termofixas, ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de zinco e ligas de aço comum ao carbono com fácil usinabilidade e com menor preço de aquisição, tem-se a redução dos custos de material, de usinagem e de trabalho manual (MENGES *et al.*, 1999). Estes materiais são utilizados na fabricação de moldes-protótipos para a injeção de lotes-piloto, pré-séries ou ainda, em alguns casos, representar toda a necessidade do produto injetado.

Neste contexto, a reciclagem do material do molde-protótipo torna-se interessante do ponto de vista econômico e ambiental. O uso na indústria de materiais recicláveis reduz os custos de logística (CORRÊA e CORRÊA, 2005) e a emissão de passivos ambientais (LAYARGUES, 2002).

A razão da existência de um molde-protótipo é de se obter um produto injetado com as características de um injetado de maneira convencional, nas fases iniciais de desenvolvimento de produto. Assim, critérios de manufaturabilidade e de qualidade mecânica são importantes na fabricação do molde protótipo. Entretanto, se este molde não for capaz de produzir um injetado com qualidade semelhante ao injetado no molde de produção, sua aplicação será limitada, por não satisfazer as qualidades requeridas no projeto do produto.

1.1 Identificação da Oportunidade

Um dos materiais que pode atender aos critérios de rápida usinagem, que tem baixo custo de aquisição, que pode imprimir qualidade no moldado e que é de possível reciclagem é a liga de zinco. Observa-se, no entanto, que são escassos os trabalhos que exploram as possibilidades deste material para moldes de baixa tiragem, bem como sua interação com o produto injetado.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é estudar a aplicação da liga de zinco comercialmente conhecida como zamac-8 (norma ASTM B-240) como material para molde-protótipo usinado, através da análise do polipropileno injetado neste material

e comparando-as com o injetado em aço. Aspectos como custo da matéria-prima, tempo de obtenção da ferramenta, propriedades físico-mecânicas do injetado, contaminação e reciclagem do material do inserto serão considerados.

1.3 Objetivos Específicos

- Avaliar as vantagens da utilização do zamac-8 para fabricação de insertos para moldes protótipo;
- Comparar propriedades mecânicas e físicas do produto injetado em um molde de zamac-8 com o injetado em molde de aço carbono;
- Avaliar a ocorrência de contaminação no injetado;
- Analisar a possibilidade de reciclagem do zamac-8.

1.4 Justificativa

Este estudo se justifica pela necessidade de se levar em conta a qualidade do injetado e não somente critérios da fabricação do molde, permitindo a materialização do injetado de acordo com a sua funcionalidade mecânica ou estética expressa em projeto. Desta forma, o molde-protótipo e seu injetado são dependentes do conhecimento de materiais e técnicas que permitam sua fabricação e posterior obtenção de um injetado com qualidade.

Há ainda alguns fatores no campo da administração que este estudo poderá atingir. Para a gestão, fatores considerados importantes são: econômicos, sociais e ambientais.

Como fator econômico tem-se a possibilidade de viabilizar o atendimento a nichos específicos de mercado, com uma necessidade de baixa demanda de produtos injetados e que tenha manufaturabilidade.

Ambientalmente deve atender aos três “erres” do meio-ambiente (redução, reutilização e reciclagem) tornando-o um produto ecologicamente correto. Redução do consumo de energia global pelo tempo para a realização da ferramenta, bem como na geração de resíduos, freando o consumo de matéria-prima e melhorando a

gestão destes resíduos sólidos. Reutilização desta ferramenta em uma nova ferramenta de injeção, num encadeamento do ciclo de desenvolvimento de produto. Esta reutilização representa uma redução na mobilização financeira na aquisição de novo material. Com a redução de custos de acompanhamento (*follow up*), elimina também os custos de inspeção e contagem de material recebido (CORRÊA e CORRÊA, 2005) e ainda a reciclagem desta ferramenta.

Considerando uma empresa de usinagem, com a possibilidade de oferecer um molde-protótipo, esta começa a definir competências em seu ramo, apresentando as três características necessárias para tanto (CORRÊA e CORRÊA, 2005). Primeiro, é o valor para o cliente, dando uma contribuição desproporcional ao valor percebido. Depois, a diferenciação sobre a concorrência. Para que uma competência se qualifique, ela deve ser competitivamente exclusiva (CORRÊA e CORRÊA, 2005). Por fim, a extendibilidade, que é servir de porta de acesso para mercados futuros e ainda do desenvolvimento de competências futuras.

Com legislações restritivas quanto à emissão de passivos ambientais, empresas responsáveis pelo ciclo de vida do produto e respondendo por este em qualquer uma de suas fases, crê-se na possibilidade de encapsular neste produto outros conceitos que não só os de fabricação, tais como saúde e meio ambiente, dando um retorno satisfatório aos preceitos legais e sociais.

Assim, como algumas saídas secundárias desejáveis têm-se os fatores econômicos, ambientais e sociais.

1.5 Organização do trabalho

No Capítulo 1, mostra-se uma introdução e apresentação do problema, seguido dos objetivos a serem atingidos com este estudo. O Capítulo 2 mostra o que é o processo de injeção e as exigências deste processo. Inclui ainda a descrição dos materiais normalmente utilizados na confecção de um molde protótipo, suas possibilidades e limitações no emprego em moldes-protótipo. O Capítulo 3 apresenta a abordagem metodológica proposta neste trabalho sobre o material a ser ensaiado, com análises e considerações das propriedades físicas, mecânicas e suas alternativas. No Capítulo 4, analisa-se e discutem-se os resultados obtidos com este

estudo, onde sua importância é reforçada. Por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões da realização deste estudo.

2 MOLDES-PROTÓTIPO E SUA INFLUÊNCIA NO MOLDADO

Neste capítulo descreve-se o processo de injeção, suas exigências mecânicas, características da ferramenta, as vantagens do uso do CNC, alguns materiais alternativos utilizados na obtenção de um molde protótipo bem como os estudos realizados do impacto do material do molde nas propriedades do moldado

2.1 Processo de Injeção e Seus Requisitos

Segundo Rosato *et al.* (2000), a injeção de plástico responde por 32% do consumo deste material na indústria, representando assim uma parcela significativa e muito importante deste mercado.

Para um melhor entendimento deste processo, aborda-se a seguir o que é o polímero, em especial o polipropileno, o processo de injeção, suas características e exigências.

2.1.1 Características Básicas dos Polímeros

Polímero é uma macromolécula formada pela repetição de pequenas e simples unidades químicas (monômeros), ligadas covalentemente. Se somente uma espécie de monômero está presente na estrutura do polímero, este é chamado de homopolímero (BLASS, 1988). Se espécies diferentes de monômeros são empregadas, o polímero recebe a denominação de copolímero.

Polímeros em seu estado sólido podem ser constituídos de fases amorfas e cristalinas. Enquanto os polímeros amorfos não contêm regiões cristalinas, os polímeros ditos cristalinos são geralmente apenas semicristalinos, contendo quantidades razoáveis de material amorfo. Esta cristalinidade são arranjos ordenados de moléculas (BLASS, 1988). Na Figura 2.1, observa-se uma comparação da estrutura de um polímero amorfo e um cristalino.

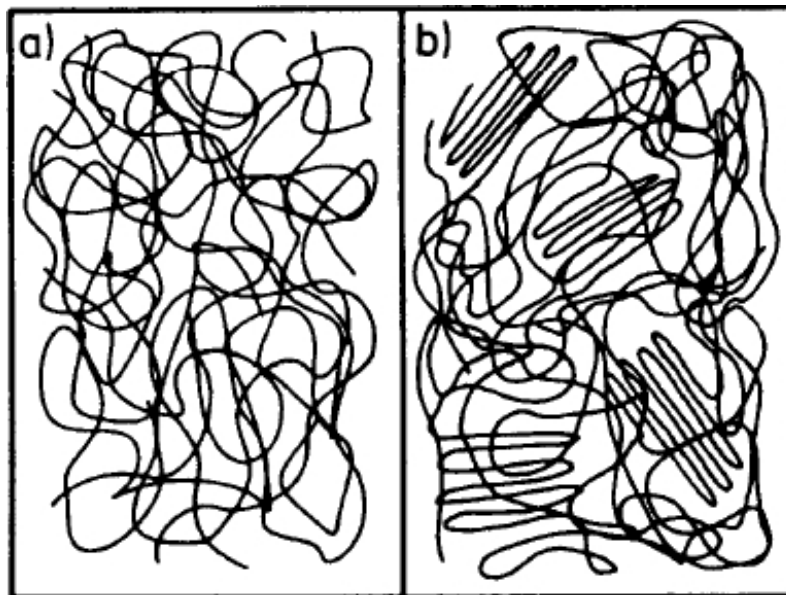


Figura 2.1 – Morfologia esquemática dos materiais poliméricos: a) termoplástico amorfo e b) termoplástico cristalino (adaptado de PADILHA, 2000)

Pelo esquema, a chamada cristalinidade do polímero é apenas uma certa organização de sua estrutura. Considerando-se um mesmo polímero, à medida que o grau de cristalinidade aumenta o módulo elástico, a resistência ao escoamento e a dureza também aumentam (BRETAS e D'ÁVILA, 2000).

Polímeros importantes apresentam um estado vítreo a baixas temperaturas e aumentando-se gradativamente esta temperatura, formam líquidos viscosos. A transição entre o estado vítreo e o estado viscoso é conhecida como transição vítrea (BLASS, 1988). Esta transição é marcada por uma temperatura (T_g), característica para cada polímero, onde há o início da movimentação molecular no material (CARDON *et al.*, 2006). A variação da T_g do polímero indicará uma possível contaminação do injetado ou ainda, um rápido resfriamento do moldado (PLEPIS, 1991).

Aquecendo-se ainda mais este polímero, ele atinge sua T_m , temperatura de fusão, e a coesão dos domínios cristalinos é desfeita. O polímero termoplástico nesta temperatura começa a se fundir, comportando-se como um fluido, menos viscoso e mais flexível (CARDON *et al.*, 2006). Acima da T_m , o polímero pode ser processado (BLASS, 1998), com temperaturas de 40°C a 60°C acima de sua temperatura de fusão.

Assim, como consequência, a temperatura para processamento de polímeros não é limitada pela T_g e sim pela T_m (CARDON *et al.*, 2006).

Como estas duas temperaturas de transição tratam de dar mobilidade à cadeia polimérica, todo e qualquer fator que leve a um aumento das forças intermoleculares secundárias e a rigidez da cadeia, influenciará a ambas, T_g e T_m . Assim, uma interdependência ocorre entre elas, apresentando uma diferença de temperatura praticamente constante (CANEVAROLO, 2002)

2.1.2 Propriedades mecânicas dos polímeros

Os materiais poliméricos apresentam comportamentos mecânicos pouco uniformes (CALLISTER, 1994). Polímeros termorrígidos têm características mecânicas frágeis. Os termoflexíveis possuem características dúcteis, ao passo que os elastômeros têm características elásticas. Estes comportamentos são mostrados na Figura 2.2.

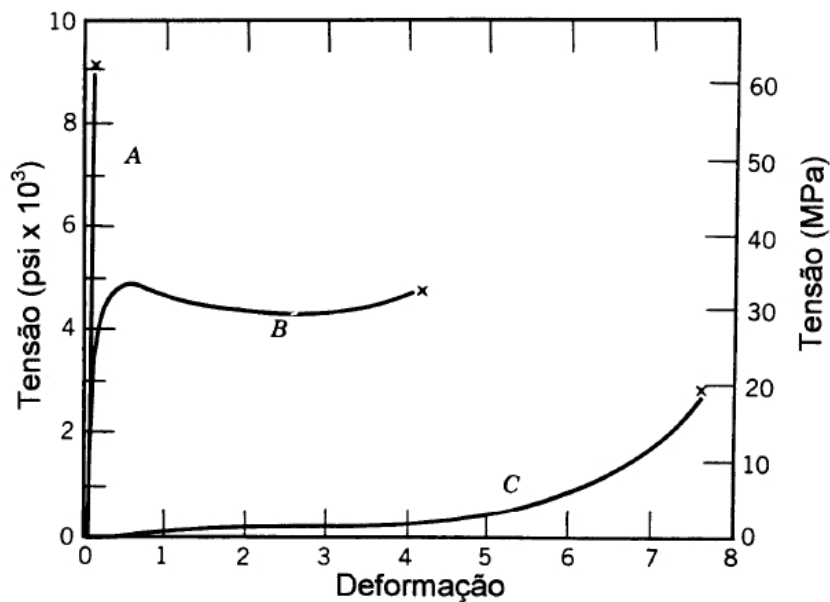


Figura 2.2 - Curvas tensão/deformação obtidas no ensaio de tração de diferentes tipos de polímeros: comportamento frágil (A), comportamento dúctil (B) e comportamento elástico (C) (CALLISTER, 1994).

Os polímeros podem sofrer mudanças estruturais que mudam suas propriedades físicas e mecânicas. As propriedades mecânicas dos polímeros são mais dependentes do tempo e da temperatura. A influência do tempo e temperatura no módulo de elasticidade dos plásticos advém das suas baixas forças de atração intermolecular e da flexibilidade das cadeias poliméricas, que lhes atribui um comportamento mecânico denominado de viscoelasticidade (BRETAS e D'ÁVILA, 2000).

Assim, as cadeias poliméricas são de importância primária no controle das propriedades mecânicas do injetado. Testes dinâmicos, em geral, dão mais informações sobre os materiais que outros testes (MURAYAMA, 1978). A maioria dos plásticos estão sujeitos às solicitações mecânicas, quer na montagem ou na aplicação final. Como a característica mecânica do injetado se relaciona diretamente com sua aplicação final, informações obtidas em ensaios mecânicos ajudam a previsão do comportamento do material em uso (MALLOY, 1994).

Em seus estudos Ishizaki *et al.* (2006), indicam que o histórico térmico do polímero tem forte influência no ensaio de flexão. Neste estudo, o polipropileno foi processado em temperaturas de 170 °C, 180 °C e 190 °C. No resfriamento foi utilizado água. Relatam que houve um decréscimo de cerca de 20% no módulo de flexão do polipropileno processado a 170 °C comparado ao PP processado a 190 °C.

2.1.3 Características e processamento do polipropileno (PP)

Polipropileno é um homopolímero linear, da classe das polioleofinas (MANO, 1985) e oriundo da polimerização catalítica do gás propileno ($\text{CH}_3\text{CH}:\text{CH}_2$). Esta classe de material representa mais da metade do consumo total de plásticos no mundo (CARDON *et al.*, 2006). É um polímero termoflexível e semicristalino com ponto de fusão de 165 °C (BRADY, 2002). Sua máxima cristalinidade é de 65%. Nesta cristalinidade o ponto de fusão do polipropileno é aumentando para 183 °C (CANEVAROLO, 2002).

Durante sua polimerização, dois tipos de unidades monoméricas enantiomórfas (capazes de desviar luz polarizada) são formadas: as dextrógeras, desviando a luz para a direita, no sentido horário e as levóginas, desviando a luz para a esquerda, no sentido anti-horário (PÉREZ, 1993). Estas unidades podem

agrupar-se e formar cadeias com três diferentes formas: Se há a predominância de uma destas unidades, é denominado polipropileno isotático; se há uma alternância, denomina-se polipropileno sindiotático; e se não existir qualquer ordem, designa-se polipropileno atático (COWIE, 1991).

A possibilidade de cristalização é maior nos arranjos isotáticos, razoável nos arranjos sindiotáticos e pequena nos arranjos atáticos (PADILHA, 2000). O polipropileno isotático tem Tg de -10°C (MAIA e DePAOLI, 2000). Estes autores ainda utilizaram análise de MEV com EDS para o acompanhamento do TiO_2 na massa do moldado em polipropileno.

Durante a moldagem por injeção, o processo de cristalização começa quando o polímero esfria abaixo da temperatura de fusão. O resfriamento no molde é uma das características mais importantes que afetam o grau de cristalinidade de um polímero. O grau de cristalização de polímeros, tais como poliolefinas, reflete a resistência mecânica do produto moldado (CARDON *et al.*, 2006), onde os ensaios mecânicos são influenciados pela rede cristalina do corpo de prova (GARCIA *et al.*, 2000).

A organização cristalina de polipropileno é sob forma de lamelas. Lamelas podem ser obtidas quando monocristais são crescidos de forma relativamente lenta em soluções diluídas (ENCYCLOPEDIA OF POLYMER, 1987; *apud* PINTO, 1998). Esta organização morfológica, ou cristalinidade, é determinada pelo histórico termomecânico da amostra. Tratamentos térmicos podem alterar esta distribuição (PINTO, 1998) e o resfriamento em repouso, pode alterar a formação de lamelas para esferulitos (PADILHA, 2000).

A cristalinidade não exclui a possibilidade de fases amorfas nas regiões cristalinas e esta combinação de fases define o grau de taticidade (PADILHA, 2000). Este grau então define regiões cristalinas, separadas por cristais, diluídos numa fase amorfa (PINTO, 1998).

Pela ausência de continuidade entre estas fases pode-se considerar que sua deformação ocorre por movimentação de defeitos (PINTO, 1998). Estas discordâncias opõem uma resistência mecânica aos esforços sofridos. Esta resistência é maior que em termoplásticos amorfos (PADILHA, 2000).

O polipropileno é bem adaptado para moldagem em qualquer injetora disponível comercialmente (ROSATO *et al.*, 2000). Temperaturas do molde de até

32°C são satisfatórios no seu processamento em injeção, no entanto para melhoria da resistência mecânica do polipropileno, a elevação da temperatura do molde até 54°C é desejável (*ibidem*).

Normalmente, são utilizadas velocidades de injeção altas na moldagem de polipropileno. Se o enchimento da cavidade é lento, principalmente nas seções finas desta, o primeiro material que entra na cavidade pode esfriar muito mais rapidamente do que o subsequente, resultando num preenchimento incompleto, laminação (formação de uma pele) ou ainda empenamento. Este problema está presente em qualquer termoplástico, mas segundo Rosato *et al.* (2000) é mais acentuado na moldagem do polipropileno.

O módulo elástico do polipropileno aumenta linearmente com a densidade. Qualquer variação no processamento, ou pós-processamento, tais como resfriamento lento, tratamento térmico, que proporcione alteração na densidade e na cristalinidade, também alterará seu módulo elástico e sua rigidez (CANEVAROLO, 2002).

Ensaio e análises utilizados na determinação das propriedades físico-mecânicas dos moldados, são descritos brevemente nas seções e sub-seções seguintes.

2.2 Ensaio Mecânicos

O entrecruzamento de cadeias poliméricas é de importância primária no controle das propriedades mecânicas do injetado. Testes dinâmicos, em geral, dão mais informações sobre o material que outros testes (MURAYAMA, 1978). São poucas as aplicações onde a integridade estrutural do plástico não é importante.

A maioria dos plásticos estão sujeitos a solicitações mecânicas, quer na montagem ou na aplicação final. Como a característica mecânica do injetado se relaciona diretamente com sua aplicação final, informações obtidas em ensaios ajudam a previsão do comportamento do material em uso (MALLOY, 1994).

Estes ensaios ocorrem sobre um período limitado de tempo em condições ideais de um laboratório. Desta forma, as descrições das propriedades dos materiais

não representam as suas condições usuais, porém fornecem a base inicial para seleção do material.

2.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um dos ensaios mais utilizado na determinação das propriedades mecânicas da maioria dos materiais (CANEVAROLO, 2002). No ensaio de tração, um corpo de prova com formas e dimensões padronizadas é submetido a uma força de tração uniaxial que tende a esticá-lo ou alongá-lo.

Durante o ensaio, são medidas a força e a deformação correspondente. Em geral, o ensaio é realizado até a ruptura do corpo de prova. O ensaio de tração é realizado com a temperatura constante e com a velocidade de deformação (velocidade de afastamento das garras) mantida aproximadamente constante. O ensaio de tração pode ser realizado tanto em temperaturas muito baixas como em altas temperaturas.

Para a grande maioria das aplicações, o ensaio é realizado na temperatura ambiente (PADILHA, 2000). O módulo de elasticidade obtido neste ensaio é a razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida. Polímeros possuem módulos de elasticidade baixos, variando entre 0,002GPa a 4,8 GPa. (CALLISTER, 1994).

2.2.2 Ensaio de flexão

Para os materiais com características frágeis, como os materiais cerâmicos, a determinação das propriedades mecânicas por meio do ensaio de tração é muito difícil experimentalmente.

No caso de materiais frágeis, o ensaio mais utilizado é o ensaio de flexão. A resistência à flexão é definida como a tensão máxima de tração na ruptura e é denominada como módulo de ruptura (PADILHA, 2000).

Com a possibilidade da formação de uma pele frágil no processamento do PP (ROSATO *et al.*, 2000), utilizou-se deste ensaio para averiguação desta possibilidade.

2.3 Ensaios Físicos

Estes ensaios têm por finalidades verificar as condições físicas dos injetados, detectando alguma mudança ocorrida durante seu beneficiamento, quer por contaminação ou pelo resfriamento. Destes ensaios, escolheu-se os seguintes:

2.3.1 Análise de MEV com EDS

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com o feixe incidente.

Quando o feixe primário incide na amostra, parte dos elétrons difunde-se e constitui um volume de interação cuja forma depende principalmente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra. Neste volume, os elétrons e as ondas eletromagnéticas produzidos são utilizados para formar as imagens ou para efetuar análises físico-químicas (DEDAVID *et al.*, 2007).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Detector de Energia Dispersiva de Raio-X (EDS) tem sido uma ferramenta de trabalho utilizada pelos pesquisadores em várias áreas de concentração, uma vez que ela abrange um conjunto de técnicas que possibilitam a caracterização da morfologia do material, composição química e determinação da estrutura atômica, tanto de metais, como de cerâmicas e polímeros.

O MEV permite observações diretas das estruturas. Este ensaio é usado para estudar as superfícies dos materiais poliméricos tais como, plásticos, filmes, membranas, fibras e compósitos (DEDAVID *et al.*, 2007).

2.3.2 Análise de DSC

A calorimetria exploratória diferencial (da sigla em inglês, DSC) foi desenvolvida como uma técnica capaz de quantificar a energia envolvida nas reações.

Num forno, cadinhos são dispostos sobre uma base de metal condutor, geralmente platina. A amostra e a referência são então aquecidas pelo mesmo sistema de fornecimento de energia. Cada vez que a amostra reage, um fluxo de energia se estabelece entre os cadinhos através da base de platina.

Os dados, correspondentes ao aumento da temperatura de ambos os cadinhos no interior do forno, na forma de potencial elétrico (μV), devem aumentar linearmente e simetricamente. O fluxo é então mensurado através dos sensores de temperatura posicionados sob cada cadinho, obtendo assim um sinal proporcional à diferença de capacidade térmica entre a amostra e a referência (WENDHAUSEN, 2010).

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) tem sido usada na determinação da temperatura de transição vítrea (T_g) de polímeros (PLEPIS, 1991). A variação desta temperatura indicará uma possível contaminação do produto ou ainda um rápido resfriamento do polímero (PLEPIS, 1991). Esta transição é caracterizada como uma alteração na linearidade da curva, geralmente chamado de “degrau”. Isto ocorre porque não há mudança na entalpia como em reações de fusão ou cristalização, mas somente uma mudança na capacidade calorífica (WENDHAUSEN, 2010).

2.4 Processo de injeção

Um molde para injeção de termoplástico (ferramenta de injeção) trabalha em uma temperatura relativamente mais fria que o material a ser injetado, que é aquecido no canhão da injetora, tornando-o líquido.

Quando esta massa, sendo injetada, entra em contato com a parede da cavidade, que está mais fria, a preenche e endurece, tomando a forma dada àquela cavidade. Este processo deve ser cuidadoso, para não causar turbulência de material ao encher o molde, reduzindo o desgaste do mesmo (CRUZ, 2002).

Ainda segundo o autor, este cuidado confere ao moldado tolerâncias mais apertadas e sua melhor qualidade mecânica.

2.4.1 Exigências mecânicas do processo de injeção

O projeto cuidadoso de um ferramental é o principal ponto para garantir a produção e a qualidade em um injetado, portanto devem ser observados diversos critérios técnicos, a fim de que as possibilidades de falhas possam ser minimizadas. Para tanto, uma metodologia deve ser aplicada, definindo uma rotina de trabalho, que pode variar um pouco (HARADA, 2006): avaliar a viabilidade da execução do projeto; usar da tecnologia disponível para simular o preenchimento da cavidade, servindo de referência para a regulagem da máquina durante a fase de teste e produção; levantar qual a melhor configuração de alimentação de material a ser injetado; iniciar o projeto pelos componentes, que formarão o produto, construindo a ferramenta de dentro para fora.

Os requerimentos para os materiais usados em moldes são os de usinabilidade, dureza, polibilidade e resistência a corrosão (ROSATO *et al.*, 2000). Conforme estes autores, uma dureza superficial adequada permite resistir aos efeitos da erosão dos materiais injetados e resistir ao desgaste ao longo do seu ciclo de vida planejado. Ainda, manter a superfície com um alto grau de polimento facilita a extração da peça, pela falta de adesão, auxilia o bom acabamento do injetado e facilita o fluxo de material fundido dentro da cavidade. E também, a capacidade de polimento depende da dureza, pureza e estrutura do material utilizado na confecção da ferramenta.

Os moldes normalmente são obtidos por usinagem (ROSATO *et al.*, 2000). O custo relativo da usinagem, na fabricação de moldes de injeção, representa a maior parcela, com cerca de 65%. A matéria-prima representa mais 20% nos custos de obtenção do molde (SANDVICK, 2000).

Os moldes devem resistir às pressões do processo de injeção. Segundo Cruz (2002), as principais pressões que a ferramenta é submetida no processo de injeção são: a pressão de injeção que deve estar regulada para o completo preenchimento do molde; a pressão de recalque que é auxiliar da pressão de injeção, atuando após a mesma, minimizando o rechupe no injetado; a pressão de bico que é regulada para evitar vazamento de material entre o bico de injeção e a bucha do molde; a pressão de fechamento que é regulada para a perfeita acomodação do molde com o contra-molde e ainda manter os mesmos fechados

durante a injeção e a contra-pressão que serve para auxiliar a plastificação do material injetado.

Com o tempo de resfriamento no ciclo de injeção, há o aumento da força de extração do moldado da cavidade, devendo o material de molde resistir também este esforço (JACOBS, 1996). O contato térmico entre o injetado e o molde é significativo para a qualidade do produto injetado (DAWSON *et al.*, 2008). Uma troca térmica deficiente pode comprometer a qualidade do moldado, segundo Martinho *et al.* (2004).

Para obter a melhor qualidade do injetado, a seleção apropriada do material da ferramenta é essencial. Trata-se na verdade de uma ação multitarefa que terá de considerar os seguintes aspectos (KASZYNSKI, 2004):

- Tolerâncias superficiais do injetado;
- Complexidade do projeto;
- Tamanho do molde.

Há ainda que se considerar os polímeros, sua abrasividade ou se é corrosivo. Estas características deverão ser suportadas pelo material de molde (KASZYNSKI, 2004). Outra condição é relacionada com a vida útil do molde. Segundo este mesmo autor, o material de uma ferramenta para uma pequena tiragem então poderá ser diferente da ferramenta para produção de milhares de peças.

2.5 Obtenção de Moldes-Protótipo por Prototipagem Rápida

Prototipagem Rápida (RP – *Rapid Prototyping*) é a fabricação de um protótipo físico por adição de camadas a partir de um modelo virtual (CAD), sem a necessidade de qualquer dispositivo de fixação (CHUA *et al.*, 1999). Segundo estes mesmos autores, essa tecnologia também tem sido referenciada como manufatura aditiva que se caracteriza como processo de fabricação pela deposição, em camadas, de material.

O processo ferramental rápido (RT - *Rapid Tooling*) consiste na obtenção de moldes através de tecnologia de RP. Nos últimos anos, com imposição pelo mercado, por produtos com menor ciclo de vida, estes ciclos foram reduzidos pela

metade. Assim, o tempo de desenvolvimento de um ferramental, foi reduzindo em 50% (NAGAHANUMAIAH *et al.*, 2007).

O curto tempo de fabricação de insertos para ferramenta, a obtenção de cavidades com formas complexas, a possibilidade de produzir canais de refrigeração de acordo com a geometria da peça, são as principais características dos processos de RT (VOLPATO *et al.*, 2007) e são vantajosas em relação ao processo CNC na obtenção de cavidades.

O uso desta tecnologia é decorrente da grande utilização de componentes injetados pelas indústrias e dos inconvenientes do uso dos moldes em aço, como aqueles relacionados com o tempo (ILYAS *et al.*, 2010) e os custos de sua obtenção.

Os processos RT podem ser classificados como direto, na qual moldes são fabricados em um sistema de RP, ou indireto. No processo RT indireto, um modelo físico, obtido através da tecnologia RP é utilizado. A partir deste modelo, se fabrica uma cavidade através de processos secundários (NAGAHANUMAIAH *et al.*, 2007).

Através do método direto, nos quais a ferramenta é fabricada diretamente do seu modelo em CAD, pode-se obter um molde-protótipo em dias (ZHOU e HE, 1999). Nos processos indiretos, a RP é uma etapa intermediária da fabricação do molde ou inserto.

Apesar da existência de processos secundários, tem-se um tempo de fabricação curto. O inconveniente deste último é que os processos secundários são fontes de erros no processo, o que pode comprometer a qualidade final da peça injetada (WOHLERS, 1998).

Há ainda que se considerar alguns pontos de inexatidão, que são inerentes aos processos de RP. Dentre eles, pode-se destacar o efeito escada, que se evidencia em superfícies inclinadas ou curvas (XU *et al.*, 1999). Este efeito é dado pela característica de deposição de camadas no processo RP e por que a camada é retangular na sua seção transversal, não podendo conformar-se na inclinação da peça, em toda a sua espessura, ocasionando um defeito dimensional na peça, conforme pode-se observar na Figura 2.3.

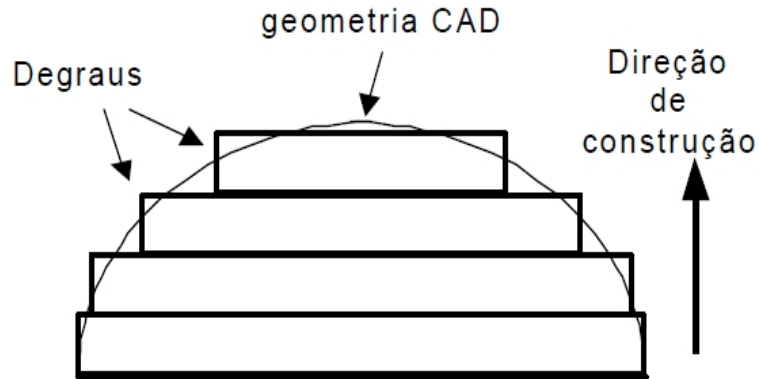


Figura 2.3 – Efeito escada na manufatura por camadas (AMORIM, 2006).

Estas inexatidões imprimem uma baixa qualidade superficial da ferramenta de injeção. Moldes geralmente requerem acabamento superficial níveis ISO N0-N2 (ILYAS *et al.*, 2010). Moldes obtidos por RT necessitam de um posterior trabalho de usinagem e acabamento de sua cavidade, aproximando-as dos níveis ISO N0-N2 (ILYAS *et al.*, 2010).

Por necessitar de uma usinagem para acabamento, mostra-se que a obtenção de um molde-protótipo diretamente da usinagem é uma alternativa competitiva (AMORIM, 2006).

A Tabela 2.1 lista o acabamento superficial em relação ao seu método de manufatura e a Tabela 2.2, compara a rugosidade de um molde obtido de maneira convencional com outros dois, obtidos por estereolitografia (SLA) e sinterização seletiva a laser (SLS), que são tecnologias RP.

Tabela 2.1 - Lista de acabamentos padrão de superfície (adaptado de ISO 2002, *apud* ILYAS *et al.*, 2010).

Classe	Ra (μm)	Requerimentos de superfície	Método de manufatura
N0-N2	$\leq 0,05$	Alto brilho e sem riscos visíveis ou linha de fluxo	Lapidação e polimento
N3	0,1	Brilhante e pequenos riscos visíveis	Polimento, retífica e HSM
N4	0,2	Acabamento técnico	Fresamento, furação e EDM
N5	0,8	Sem requisitos técnicos	Jato de areia

Tabela 2.2 - Comparação das rugosidades superficiais de molde usinado e moldes RT (adaptado de NAGAHANUMAI AH *et al.*, 2007) (Ra em microns).

Características	Limites	Molde Usinado	SLA	SLS
Superfície plana horizontal	média	0,8	1,8	16
Superfície plana vertical	média	0,8	3,2	18
Superfície inclinada	média	1,0	4,0	20
Superfície circular horizontal	média	0,8	2,2	16
Superfície circular vertical	média	0,8	3,2	18

2.6 Vantagens da Obtenção de Moldes-Protótipo por CNC

Alguns aspectos que a usinagem CNC apresenta de vantajoso em relação à obtenção de molde-protótipo pelo processo RP são (GRIMM, 2004): no processo CNC as tolerâncias dimensionais mais apertadas são possíveis (ILYAS *et al.*, 2010). De um modo geral, os acabamentos superficiais obtidos por usinagem estão próximos ao requisitos da norma ISO.

Como os sistemas RP estão a pouco mais de 20 anos no mercado e com novos lançamentos, é normal que apresentem algumas falhas (GRIMM, 2004). O CNC já apresenta uma concepção bem amadurecida e que a torna confiável (ARNOLD, 2001).

É possível usinar qualquer material num processo CNC e com o advento da usinagem cinco eixos, também há uma maior liberdade de formas usináveis. A oferta de material é alta, não limitada por um depósito de matéria-prima dedicada.

Adicionalmente, como o tempo é um fator importante na obtenção do molde-protótipo, a usinagem em alta-velocidade (HSM), que eleva, por exemplo, a rotação

da ferramenta de 5000rpm para 50.000rpm, com controle de dados direto do CAD, estes produtos podem ser obtidos mais rapidamente (RADSTOK, 1999).

A Tabela 2.3 mostra a obtenção de um molde pelo processo de usinagem CNC e por RT indireto. Comparam-se seus tempos, custos, ciclos e suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.3 - Comparação de técnicas de obtenção de molde-protótipo por usinagem CNC e fundido em resina (adaptado de ZHOU e HE, 1999).

Processo	Tempo (semanas)	Custo (US\$)	Ciclos	Vantagens	Desvantagens
Usinagem CNC	6-8	2.000 -20.000	3.000 - 250.000	Grandes Volumes	Limitações Geométricas
Compósito Epoxídico	2-6	2.000 – 10.000	50 – 2.000	Material de produção	Limitações de projeto

2.7 Materiais Alternativos Usináveis para Moldes-Protótipo

Aço comum ao carbono, ligas de alumínio, ligas de zinco, ligas de cobre e resinas termofixas são alguns dos materiais encontrados na literatura com algum estudo ou indicação de uso nas ferramentas de injeção não definitivas (moldes-protótipo).

Esta seção apresenta algumas características técnicas comparativas dos principais materiais encontrados e a seção seguinte explora a influência no moldado por injeção quando da utilização destes materiais.

2.7.1 Resinas

As resinas termofixas apresentam um alto valor de aquisição por peso, se comparado aos metais. Para uso em ferramentas de injeção dividem-se em dois grupos: resinas epoxídicas e poliuretânicas, com ou sem cargas de reforços. Estas cargas são utilizadas para se diminuir o volume de material empregado na confecção do molde e, utilizando-se cargas metálicas, melhorar suas trocas térmicas (VASCONCELOS *et al.*, 2005).

As resinas têm a possibilidade de serem usinadas a altas velocidades de avanço e corte, diminuindo o custo de obtenção da ferramenta. No entanto, são impossíveis de se trabalhar com eletro-erosão (EDM) (AMORIM, 2006). Com baixa condutibilidade térmica, o molde em resina aumenta o tempo do ciclo de injeção (HOPINKSON e DICKENS, 2000). Também as pressões de injeção devem ser menores que as usuais, devido à pequena resistência mecânica dos moldes de resinas comparados aos obtidos por processos de usinagem em metais (LENCINA, 2003).

Estas resinas são pouco resistentes as trincas catastróficas, diminuindo sua vida útil. Esta característica se relaciona com a baixa temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas (HOPINKSON e DICKENS, 2000), facilmente alcançável no processo de injeção.

Volpato e Derinieviski (2005) relatam o lascamento de material em processo de usinagem CNC, que foi solucionado com a redução do avanço da ferramenta de usinagem, aumentando o tempo de usinagem.

Adicionalmente, são materiais de difícil reciclagem. Também Pinheiro (2008) em seu estudo comparativo, relata a fratura de um macho do molde de resina no primeiro ciclo do processo de injeção.

Naquele estudo este componente ficou aderido à massa do moldado o que exigiu um retrabalho para recuperação parcial do molde e sua utilização no processo de injeção.

Já Salmoria *et al.* (2008) relatam que um controle de temperatura em moldes compósitos (epóxi/alumínio) é importante para evitar a falha prematura da ferramenta.

2.7.2 Ligas de cobre

Ligas de cobre por possuírem excelente condutibilidade térmica e relativa dureza, oferecem algumas qualidades que são aconselháveis na obtenção do injetado, garantindo assim a estabilidade dimensional diminuindo o empenamento, o rechupe e as tensões internas (KASZYNSKI, 2004).

Apesar de se produzir ferramentas de injeção, estes materiais são normalmente utilizados como materiais auxiliares na confecção de componentes dos moldes, como trocadores de calor (MENGES *et al.*, 1999).

A velocidade de usinagem é muito maior que se comparada do molde em aço. Entretanto, sua alta condutibilidade térmica pode afetar o tempo de usinagem por EDM, para o acabamento do processo. O material aceita tratamento superficial e permite um acabamento espelhado por polimento. Ligas de cobre-zinco, conhecidas como latão, possuem até 40% de zinco como elemento de liga. São as que possuem melhor usinabilidade (BRALLA, 1999).

Altamente resistente a corrosão, um problema em especial ocorre no latão: como a liga contém um porcentual alto de zinco, a dezincificação pode ocorrer, por corrosão seletiva, deixando o molde poroso. Para preveni-lo é necessária a adição de inibidores, tais como antimônio, chumbo e fósforo de no máximo 0,05%, em sua liga (BRADY *et al.*, 2002). Estes inibidores, por contrariar o protocolo do ministério da saúde em relação ao chumbo (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006), limitam sua possibilidade de uso para esta aplicação.

As ligas de cobre-estanho, conhecidas originalmente como bronze, hoje se aplicam também as ligas com adição de elementos como zinco, níquel, alumínio e fósforo. Esta liga possui até 20% de estanho, que confere maior resistência mecânica, sem a queda da ductilidade. A principal qualidade desta liga é possuir um baixo coeficiente de atrito.

Têm-se as melhores propriedades mecânicas no bronze-latão (SAE 65) deoxidado com fósforo (bronze fosforado), que contém um porcentual de chumbo (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006) que diminui seu coeficiente de atrito e facilita a usinabilidade (BRADY *et al.*, 2002).

Apresentam alta densidade, representando um consumo maior deste material por volume e dentre as ligas apresentadas é a que apresenta o maior preço

de aquisição. Ligas de cobre-estanho vêm sendo substituídas pela liga de zinco (BRADY *et al.*, 2002).

2.7.3 Aço comum ao carbono

Aços carbonos são classificados normalmente de acordo com a quantidade de carbono na liga. Com o aumento do teor de carbono, aumenta-se a resistência à tração, como também sua dureza (GROOVER, 2002). A dureza é o quesito mais importante a ser levado em conta na seleção deste material para ferramentas de injeção (HARADA, 2006).

Segundo este autor, esta propriedade define quatro grupos na escala de dureza. Aços com dureza até 285 HB, de menor resistência como o 1045, são utilizados em ferramentas voltadas a injeção de utensílios comuns. Até 313 HB, está a categoria do aço P-20, utilizado na maioria dos moldes. De 351 a 389 HB, são para ferramentas feitas para suportar a abrasividade de alguns plásticos e resinas com cargas. Acima de 389 HB, são para ferramentas que exijam resistência extrema (SANT'ANNA, 2009).

Aços comuns ao carbono aceitam tratamento superficial, aumentando a resistência corrosão, à erosão e trincas térmicas. São de boa usinabilidade e reciclabilidade, entretanto apresentam o menor índice de condutibilidade térmica entre os materiais metálicos (ligas de alumínio, ligas de zinco e ligas de cobre). Esta propriedade pode diminuir o ciclo de injeção, comparado a outros metais (KASZYNSKI, 2004).

Devido à alta temperatura de fusão do aço, sua reciclagem exige equipamentos mais robustos e potentes e uma empresa de ferramentaria dificilmente disporia destes equipamentos.

Uma solução seria a de vender este material de qualidade, a preço de sucata, para uma empresa especializada em reciclagem de aço.

Também importante é que quanto maior sua dureza, maior será sua polibilidade e melhor a qualidade do injetado (ROSATO *et al.*, 2000). Harada (2004) indica o uso de aço 1020 e 1045 para a fabricação de molde de até médias tiragens, relacionando na Tabela 2.4 esta produção com a abrasividade do material injetado e tratamento térmico e superficial.

Tabela 2.4 - Sugestão de utilização de aço carbono em ferramentas de injeção. T.T. - Tratamento térmico. T.S. - Tratamento superficial (HARADA, 2004).

Produção desejada	Abrasividade do Polímero	
	Baixa	Média
Baixa	Aço Carbono 1020 e 1045 T.T: Nenhum T.S: Nenhum	Aço Carbono 1020 E 1045 T.T: Nenhum T.S: Nitrocarbonetação
Média	Aço Carbono 1020 e 1045 T.T: Nenhum T.S: nitrocarbonetação	

2.7.4 Ligas de alumínio

Ligas de alumínio são indicadas mais comumente para a geração de moldes de baixa tiragem ou moldes-protótipos (KASZYNSKI, 2004).

Mais econômico que a geração em aço (HILTON e JACOBS, 2000) por sua melhor usinabilidade, suas maiores vantagens são: baixa densidade, grande condutibilidade térmica, diminuindo a necessidade de sistemas de refrigeração (KASZYNSKI, 2004) e resistência à corrosão.

Com um terço da densidade do aço, as ligas de alumínio permitem operações de usinagem em velocidades elevadas, com menor desgaste do equipamento e ainda, com menores esforços inerciais, a vibração do conjunto diminui, aumentando a qualidade do acabamento superficial (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

Sua usinabilidade é de oito a dez vezes mais rápidas que em aço (KASZYNSKI, 2004), exigindo menos tempo de usinagem em máquina CNC. As ligas de alumínio têm um ponto de fusão entre 530° e 700° C, temperaturas facilmente alcançadas nos processos de usinagem, existindo a facilidade de ocorrer

soldagem por fusão no gume da ferramenta de corte. Assim, o uso de meios lubrificantes é necessário para remoção do calor e evitar a formação do gume postiço (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991). Com 1/3 do módulo de elasticidade do aço, exige certos cuidados para evitar deformações em sua usinagem, tais como: trabalhar com avanços menores, evitando flexões indesejáveis e utilizar ferramentas com ângulos de corte agudos e gumes bem acabados e polidos (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

Por sua inferior qualidade mecânica, as paredes dos moldes obtidos em alumínio têm de ser 40% mais largas que a do molde em aço. As cavidades devem ter raios tão generosos quanto possíveis (KASZYNSKI, 2004).

Desta forma, para uma mesma cavidade, exige maior volume de material que o aço. O alumínio é reciclável e em sua reciclagem, não se perdem suas características físico-químicas (ALCOA, 2011). Entretanto, por seu ponto de fusão relativamente elevado, 660 °C, exige sua reciclagem em empresa especializada (PRADO, 2007).

2.7.5 Ligas de zinco

Ligas de zinco são materiais utilizados na fabricação de moldes somente para moldes-protótipos ou de baixa tiragem (MENGES *et al.*, 1999). As ligas de zinco possuem excelente resistência à corrosão e baixo preço de aquisição (ALPHA, 2005). A mais usual liga de zinco chama-se genericamente de zamac. O nome zamac origina-se das primeiras letras de seus elementos constituintes: **Z** de zinco, **A** de alumínio, **MA** de magnésios e **C** de cobre.

Estas ligas, assim como as de alumínio, são de fácil usinabilidade e reciclabilidade (OXIDO METAL, 2008). Indicadas para uso em ferramentas de injeção aceitam tratamento superficial, reduzindo os danos ao molde (ROSATO *et al.*, 2000). Possuem condutibilidade térmica comparáveis ao alumínio, conforme Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Comparação da liga de alumínio 7075 T6, usual em molde-protótipo, com zamac comercial encontrado em território nacional (adaptado de MAZAK, 2008, ALPHA, 2005 e BARETA *et al.*, 2006):

	Liga de Al.	Liga de Zn-2	Liga de Zn-5	Liga de Zn-8
Densidade a 21 °C	2,71 g/cm ³	6,79 g/cm ³	6,71 g/cm ³	6,3 g/cm ³
Intervalo de Fusão	475° a 650° C	379° a 390° C	380° a 386° C	375° a 404° C
Resistência a Tração	560 MPa	358 MPa	328 MPa	374 MPa
Condutibilidade Térmica ()	138 W/mK	104,7 W/mK	108,9 W/mK	114,7 W/mK
Dureza Brinell	140HB	100HB	91HB	110HB

A vantagem da utilização de ligas de baixo ponto de fusão, zinco por exemplo, é que completando sua função, poderá ser fundida e reutilizada muitas vezes na própria empresa e reutilizando-se este material, torna-se mais efetivo seu custo-benefício (HILTON e JACOBS, 2000). A liga de zinco utilizada é totalmente reciclável (RICK, 2006).

2.8 Características das Ligas de Zinco Comercializadas como Zamac

Algumas características desta ligas são: têm um custo de aquisição menor por peso que o aço, alumínio e resina (ALPHA, 2005), o tempo de obtenção de uma ferramenta de injeção em zamac é menor que em alumínio (JACOBS, 1996), são facilmente usináveis, com muito bom acabamento superficial (OXIDO METAL, 2008) e são encontradas comercialmente no Brasil os tipos, zamac-1 a zamac-8, com fornecedores em todo o território nacional (ALPHA, 2005). Ligas em zamac possuem dureza maior que algumas ligas de alumínio, resistindo bem à abrasão, ao desgaste e a fadiga (BRADY *et al.*, 2002). Estas são usadas largamente na indústria

moveleira, de brinquedos, na fabricação de jóias e em processo de fundição. Possuem baixo ponto de fusão e também não poluem o ambiente, questão que atualmente é tida como de importância fundamental para a proteção ambiental (RICK, 2006). Estas ligas são formadas basicamente por mais de 90% de zinco, com os outros elementos de liga fazendo o balanço (MAZAK, 2008). Ligas de zamac possuem teores de alumínio na sua composição e que variam entre 2 a 30 % (de 1% a 8% no caso brasileiro (VOTORANTIN, 2003 *apud* RICK, 2006).

O percentual aproximado de alumínio em liga denomina o zamac que é de, por exemplo, 2% dealumínio no Zamac-2 e 8% dealumínio no Zamac-8 (MAZAK, 2008).

2.8.1 Microestrutura do zamac

As transformações físico-químicas destas ligas podem ser melhor observadas no Diagrama de Equilíbrio Zn-Al, visto na Figura 2.4.

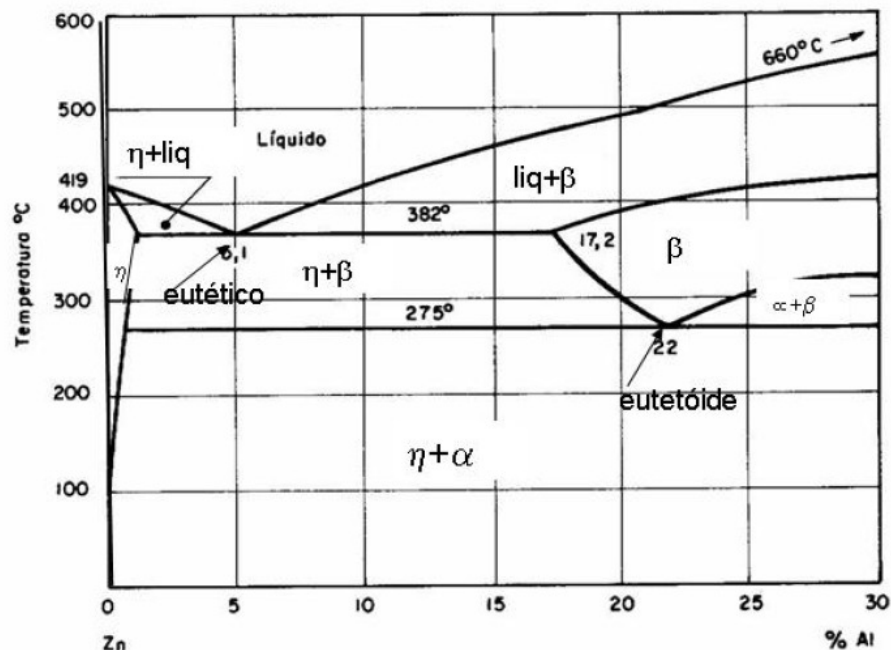


Figura 2.4 - Diagrama de Equilíbrio Zinco/Alumínio (adaptado de VOTORANTIN (2003) *apud* RICK, 2006).

Ligas de zamac-8 são classificadas como ligas hipereutéticas, enquanto as ligas Zamac-5 são classificadas como ligas hipoeutéticas.

Ao resfriar uma liga hipoeutética de Zamac, observa-se a formação de uma fase η com uma estrutura cristalina hexagonal (VOTORANTIN, 2003 *apud* RICK, 2006).

Esta fase tem 98,86% de Zinco à 382°C. Abaixo desta temperatura, a fase η fica envolta por um eutético constituído por esta mesma fase e de uma segunda fase com estrutura cúbica, denominada fase β .

A fase β possui 22% de Alumínio e prevalece até a temperatura de 275°C, quando sofre reação eutetóide, transformando-se em fase $\alpha + \eta$ (*ibidem*).

Nas ligas hipereutéticas ocorre uma maior segregação do soluto uma vez que o conteúdo de alumínio é maior (VOTORANTIN, 2003 *apud* RICK, 2006). Na Figura 2.5, pode-se observar melhor estas estruturas.

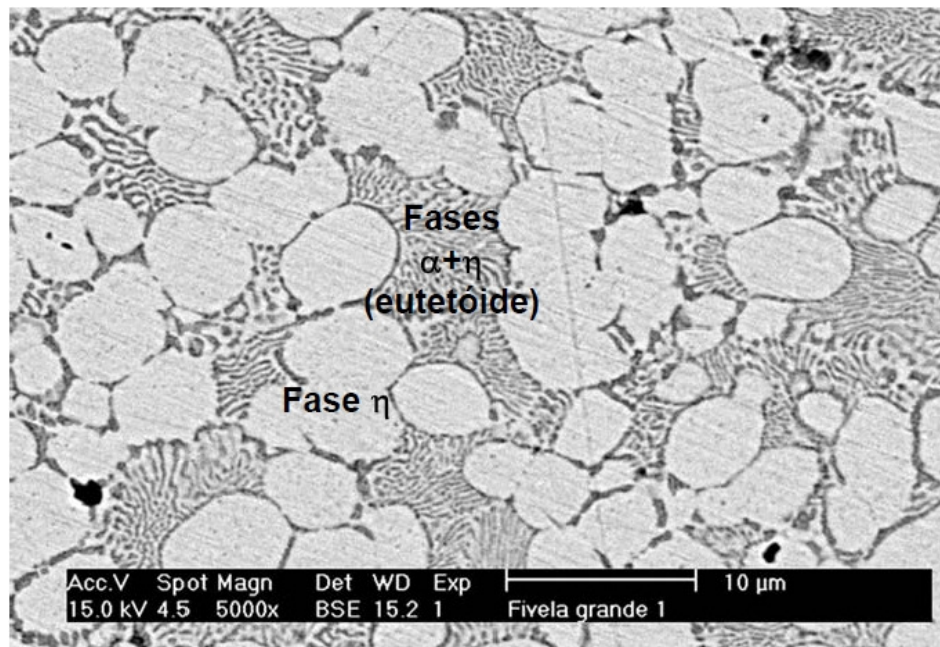


Figura 2.5 - Microestrutura de liga Zamac. A região clara corresponde à fase η e a região lamelar corresponde às fases $\alpha + \eta$ (adaptado de VOTORANTIN, 2003 *apud* RICK, 2006).

2.9 Características do Moldado em Função do Material do Molde

Nesta seção se expõem como os materiais acima descritos e utilizados como moldes, comportam-se na atividade de injeção. Também são relatadas quais as características de seus moldados.

2.9.1 Moldados em moldes de resinas

Segundo Pinheiro (2008), em seu estudo, num molde em resina PU 1007 Shore D 85, houve falta de preenchimento no moldado. Esta falta de preenchimento ocorreu no moldado em paredes de espessuras de até 1mm. Também apresentou problemas de preenchimento em elementos estruturais de fixação (pinos), que não apresentaram o furo de centro. O autor informa ainda que cantos vivos dos moldados, apresentaram arredondamentos de suas arestas. Quanto ao acabamento superficial, o moldado apresentou acabamento fosco. Problemas dimensionais no moldado também foram encontrados neste estudo. Os pontos de medições no moldado podem ser visualizados na Figura 2.6 e na Tabela 2.6, estão listadas estas variações dimensionais.

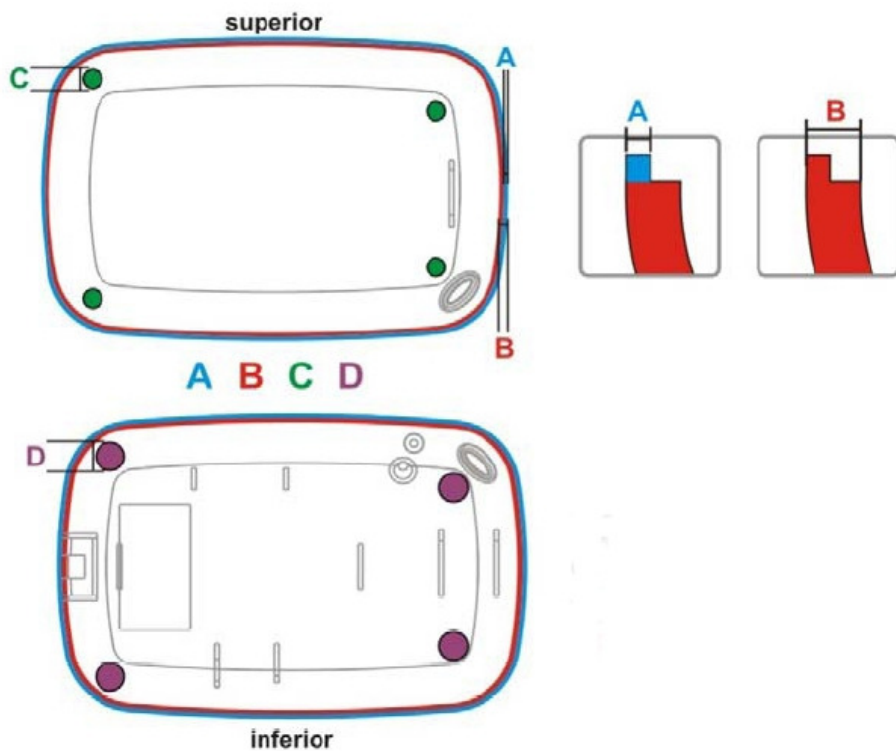


Figura 2.6 - Pontos de medição do moldado em resina (adaptado de PINHEIRO, 2008)

Tabela 2.6 – Erros dimensionais no moldado em resina (adaptado de PINHEIRO, 2008).

Medidas	Espessura de resalto (A)	Espessura de parede (B)	Diâmetro de furo do pino (C)	Diâmetro de furo de séde (D)
Projeto	1mm	2mm	4,1mm	6,3mm
Moldado	2mm	3mm	4,1mm	6,2mm

Bareta *et al.* (2006) utilizando uma ferramenta com combinação de dois materiais para macho e cavidade, relatam a contaminação por alumínio no moldado em resina. A carga de alumínio é utilizada na resina para tentar melhorar a troca térmica com o molde. Para a análise de contaminação, utilizaram a técnica de RBS. A técnica de RBS consiste em medir a energia de partículas de um feixe mono-energético incidente e que sofrem colisões com os átomos do alvo que se deseja analisar e que são retro-espalhados.

Durante a colisão, os íons perderão energia pela colisão com os átomos do material. A taxa de redução de energia da partícula espalhada (ou retro-espalhada) é dependente da razão da massa da partícula incidente e do átomo alvo. Isto permite identificar qual a massa dos átomos do alvo e, portanto, qual elemento químico correspondente (CHU *et al.*, 1978).

O contato térmico entre o injetado e o molde é significativo para a qualidade do produto injetado (DAWSON *et al.*, 2008). No estudo de moldes híbridos, que utilizam materiais metálicos e poliméricos em seus componentes moldantes, Martinho *et al.* (2004) utilizaram três configurações de moldes: cavidade e macho em resina; cavidade em metal e macho em resina; cavidade e macho em metal. O material de inserto utilizado foi o aço P-20 e a resina epoxídica SIKA L-74 e polipropileno injetado nestes moldes. Os autores relatam a deformação dimensional dos moldados por insertos em resinas, com índices de contração muito maiores que o esperado.

Salmoria *et al.* (2008) relatam que o moldado em molde de resina epóxi com carga de alumínio teve um comportamento mecânico similar ao moldado em aço. Os autores utilizaram três temperaturas diferentes na água de refrigeração do molde:

15°C, 32°C e 75°C. Com as temperaturas diferentes no líquido de refrigeração do molde, o moldado apresentou comportamento mecânico semelhante. Isto se pode observar nas Figuras 2.7 e 2.8.

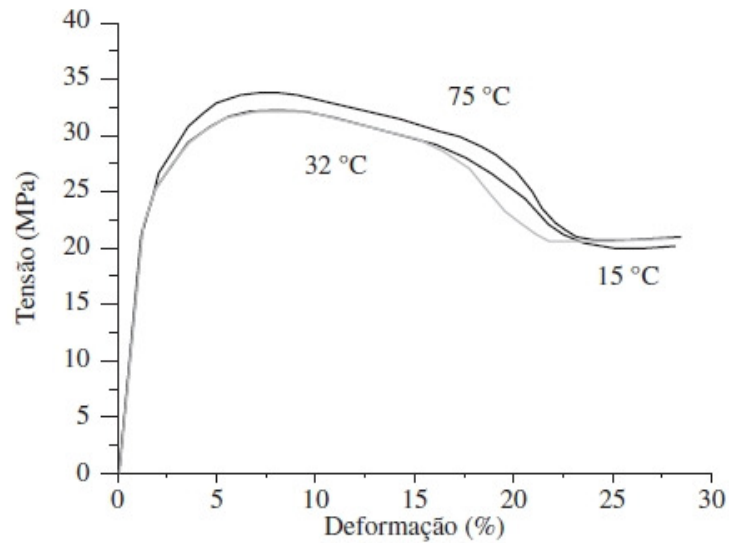


Figura 2.7 - Diagrama Tensão/Deformação de corpos-de-prova em PP injetados em moldes de epóxi/alumínio, com diferentes taxas de resfriamento (SALMORIA *et al.*, 2008).

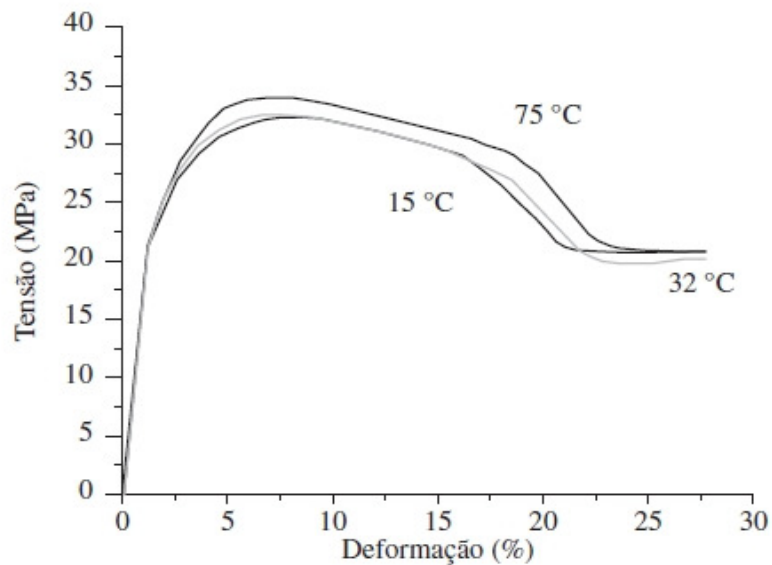


Figura 2.8 - Diagrama Tensão/Deformação de corpos-de-prova em PP injetados em moldes de aço, com diferentes taxas de resfriamento (SALMORIA *et al.*, 2008).

Os autores verificaram a influência do resfriamento no grau de cristalinidade. O maior valor encontrado do grau de cristalinidade para as amostras injetadas neste estudo foi para a temperatura do fluido de resfriamento de 75 °C. Isto resultou em taxas de resfriamento capazes de influenciar a cristalinidade do PP, um polímero de cristalização rápida, favorecendo um aumento da cristalinidade (SALMORIA *et al.*, 2008).

2.9.2 Moldados em moldes de aço comum ao carbono

Foggiatto *et al.* (2004) relatam a proximidade das durezas médias dos moldados em polipropileno no aço 1045, comparando-os com os moldados em molde de ABS, entre 68 e 69 Shore D .

Este estudo ainda mostrou que o limite de resistência à tração dos moldados são bastante similares, como se pode observar na Figura 2.9.

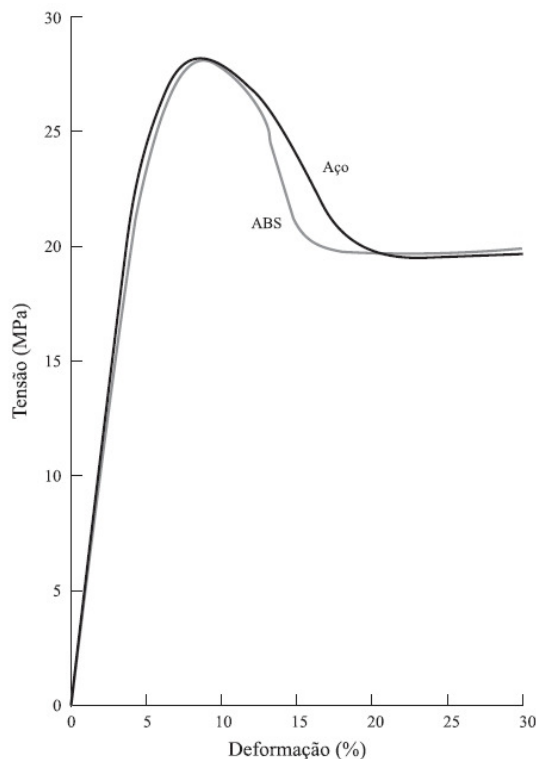


Figura 2.9 - Diagrama Tensão/Deformação de corpos-de-prova em PP injetados em moldes de aço e ABS (FOGGIATTO *et al.* (2004)).

Também Godec (*et al*, 2007) relatam a utilização de postigo em aço (AISI P-20+S), obtido de maneira convencional (por usinagem), comparando-o ao postigo em aço (material proprietário Laser Form A6), mas obtido pela tecnologia RT. A utilização de postigo neste estudo foi para se utilizar um mesmo porta-molde, sem canais de refrigeração. Os autores definiram três parâmetros de análise: comprimento, largura e massa do moldado.

Eles relatam uma deformação dimensional do moldado em aço RT, na ordem de 3,4% no eixo do comprimento e uma massa 5% menor. Os autores atribuíram esta variação à diferença térmica daquele inserto. Na produção destes insertos, com o processo RT, foi e é necessário a infiltração de bronze para diminuir a porosidade. Assim, por possuir duas fases em sua estrutura, houve uma variação do gradiente de resfriamento do moldado. Tal condição ocasionou maiores valores de retração das peças moldadas no molde RT e dificultou a manutenção de sua estabilidade dimensional.

Bareta *et al.*(2006) relatam que na análise química de Espectroscopia de Espalhamento Posterior (RBS, *Rutherford Backscattering Spectroscopy*) do moldado, houve a contaminação pelo elemento cromo, elemento de liga do aço P-20.

2.9.3 Moldados em moldes de liga de alumínio

Pinheiro (2008) relata a fabricação e utilização de um molde de alumínio para obtenção de 10.000 peças plásticas (não relata, entretanto, qual polímero foi utilizado). O alumínio utilizado foi o Alumold 500, com uma dureza entre 175 e 185 HB.

Os moldados em molde de alumínio tiveram todos os detalhes previstos em projeto, impressos sobre ele. Houve uma boa injeção nos cantos vivos e paredes finas. E todos os ressaltos foram produzidos em sua totalidade, não havendo problema de rechupe e falta de preenchimento (PINHEIRO, 2008).

Os acabamentos superficiais do moldado definidos em projeto (regiões foscas, brilhantes e espelhadas), foram conseguidos nesta ferramenta.

Entretanto, problemas dimensionais foram constatados por ele, no moldado em alumínio. Na Figura 2.10, pode-se observar os pontos de medição no produto e na Tabela 2.7, podem-se ver as variações dessas medidas no moldado.

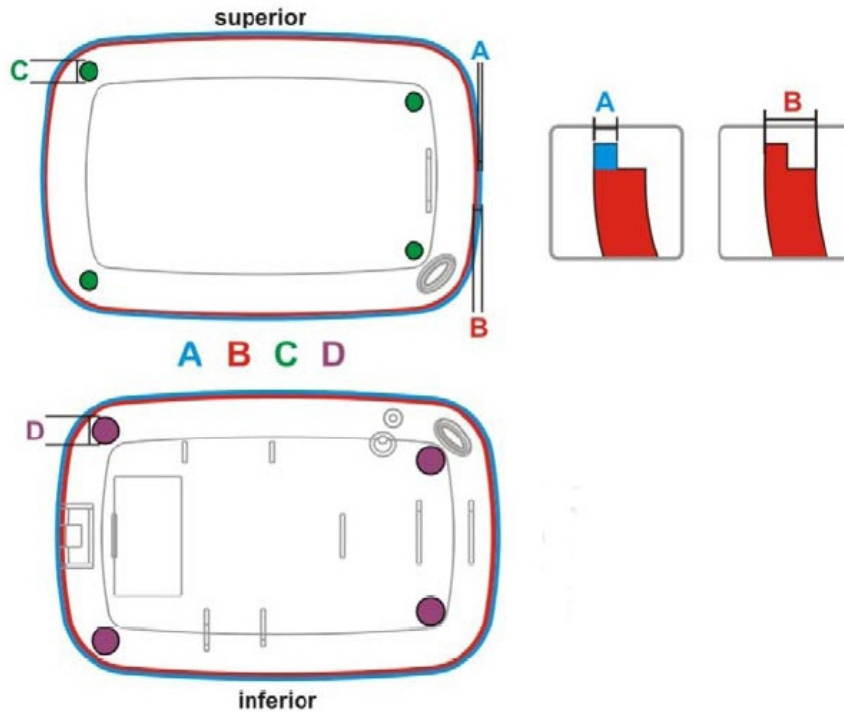


Figura 2.10 - Pontos de medição do moldado em alumínio (adaptado de PINHEIRO, 2008)

Tabela 2.7 – Erros dimensionais no moldado em molde de alumínio (adaptado de PINHEIRO, 2008).

Medidas	Espessura de ressalto (A)	Espessura de parede (B)	Diâmetro de furo do pino (C)	Diâmetro de furo de séde (D)
Projeto	1mm.	2mm.	4,1mm.	6,3mm.
Moldado	1,1mm.	2,2mm.	4,1mm.	6,2mm.

O autor relata ainda que o molde realizou 10.000 ciclos e não apresentou a ocorrência de danos. Baretta *et al.* (2006) observaram que não houve contaminação do injetado por material do molde por eles estudados..

2.9.4 Moldados em moldes de liga de zinco

Apesar das ligas de zinco serem indicadas por diversos autores para obtenção de moldes-protótipo, existem poucos estudos relativos ao seu uso como ferramenta de injeção. Um estudo foi realizado por Baretta *et al.* (2006), onde utilizou-se um macho em liga de zinco, comercialmente chamado de zamac-5, em uma cavidade de aço P-20, injetando-se polipropileno. Este moldado foi comparado a outros, utilizando a mesma cavidade em aço P-20 e com materiais do macho em aço P-20, alumínio 7075 T6 e resina epoxídica.

Os autores relatam que em ensaio de tração, o moldado no par zamac-5/P-20, teve uma resistência 6% superior ao moldado em resina/P-20, 4% inferior ao alumínio/P-20 e 8% inferior ao P-20/P-20.

Neste estudo, os moldados no par alumínio/P-20 e zamac-5/P-20, apresentaram rechupe e preenchimento incompleto. Os autores atribuíram este resultado a condutividade e o coeficiente de expansão térmica do alumínio e do zamak-5 serem superiores aos dos outros materiais.

2.10 Janela de Oportunidade

Conforme se pôde observar, estudos relativos a moldes-protótipo se concentram na utilização de aço, e como materiais alternativos, o alumínio e resinas. São escassos os estudos que contemplem a utilização de materiais metálicos comerciais em alternativa ao aço. Ainda, são escassos os estudos destes materiais alternativos e sua interação com o moldado.

Os estudos de Baretta *et al.* (2006) ressaltaram as qualidades de usinagem de um material em substituição ao aço, o zamac. Entretanto, o moldado obtido em moldes formados em pares metálicos pode ter influenciado as análises daqueles estudos.

Uma preocupação contemporânea trata do descarte de produto ao fim de sua vida útil. Não foram encontrados estudos relativos à possibilidade de reciclagem ou reutilização, visto como produto, de um molde ao fim de sua vida útil. Como também, estudos que procurassem a diminuição de passivos ambientais, comparados ao aço, no ambiente de processamento de polímero.

Assim, a janela de oportunidade deste trabalho surgiu sobre em relação a um material metálico, usinável, comercial e de fácil acesso: o zamac-8. Com a possibilidade de se reciclar o material de molde, resta saber se um molde produzido neste material é capaz de injetar um produto com as mesmas características do moldado em aço. Decidiu-se assim, a continuidade nos estudos sobre o material zamac-8.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo mostra, inicialmente, a escolha do material do molde. Em seguida, descrevem-se as etapas dos projetos dos moldes em aço e zamac, até suas obtenções.

Por fim, relatam-se os ensaios de injeção, de onde extrairam-se os corpos de prova para as análises mecânicas e físicas realizadas. O fluxograma deste ensaio pode-se observar na Figura 3.1.

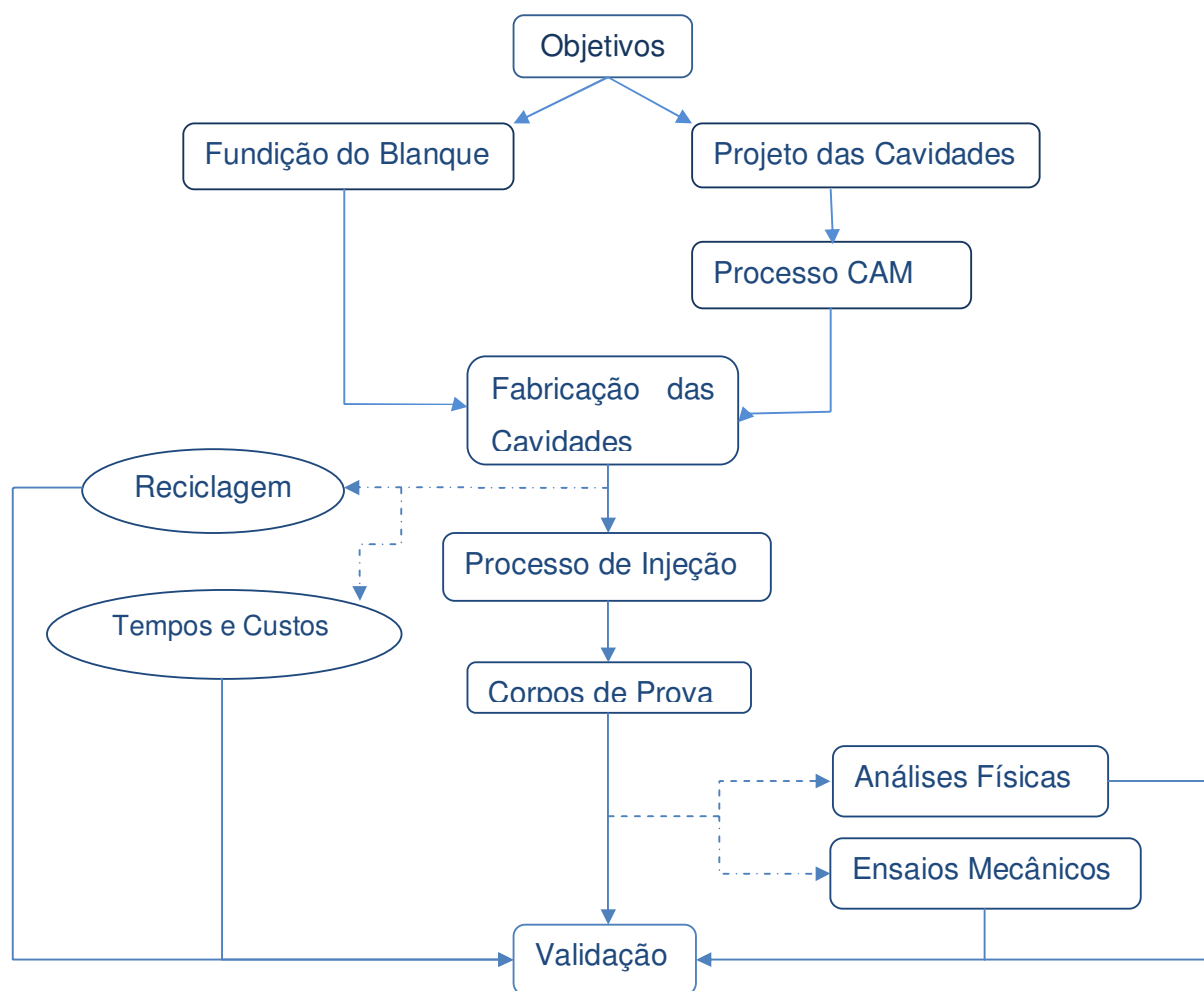


Figura 3.1 - Blaque Fluxograma dos métodos aplicados neste estudo.

3.1 Escolha dos Materiais de Molde

Dos materiais analisados, destacam-se as ligas metálicas, de ferro, de alumínio e de zinco. Estas ligas apresentaram as características mecânicas necessárias para a fabricação de molde. Estas características resistem aos fenômenos superficiais do processo de injeção. Ainda são de fácil aquisição e acesso, têm a possibilidade de reciclagem e boas características de usinabilidade.

Na Tabela 3.1, observa-se o número de ciclos do molde-protótipo com seu custo de fabricação e ainda o tempo de sua obtenção, para uma mesma cavidade.

Tabela 3.1 - Comparação de diferentes materiais metálicos em atendimento ao número de peças, tempo de fabricação e custo relativo entre eles (adaptado de JACOBS, 1996).

Nº de peças requeridas	Tipo de material da ferramenta	Custo relativo da ferramenta (\$)	Tempo de fabricação do molde (Semanas)
1.000 – 3.000	Zamac	25	12 -14
1.000 – 3.000	Alumínio	30	12 - 14
3.000 – 250.000	Aço	60	16 -40

Com estes aspectos em vista, um material promissor é a liga de zinco, conhecida comercialmente como zamac. Jacobs (1996) indica seu uso como *soft-tool*, ferramenta de menor dureza que o aço.

3.1.1 Escolha do zamac-8 como material de molde

Uma ferramenta de zamac é mais econômica em custo, com o mesmo tempo fabril, para um mesmo número de peças em relação ao alumínio, material usual na obtenção de moldes protótipo (HILTON e JACOBS, 2000).

Pelo relato de contaminação no moldado (BARETA *et al.*, 2006) e para evitar a possibilidade contaminação do injetado, propõem-se para realização do ensaio de

injeção, um molde-protótipo totalmente usinado em zamac-8. Este zamac, normatizado pelas normas ASTM B86 e B240, possui características mecânicas melhores que o zamac-5, utilizado naquele estudo, conforme se pode observar na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Comparação de algumas características físico-mecânicas das ligas zamac-5 e zamac-8, conforme o fabricante e fornecedor MAZAK (2008).

Material	Zamac-5	Zamac-8
Densidade	6,71 g/cm ³	6,3 g/cm ³
Intervalo de Fusão (<i>solidus-liquidus</i>)	380° a 386° C	375° a 404° C
Resistência à tração	328 MPa.	374 MPa.
Alongamento	7%	10%
Condutibilidade Térmica	108,9 W/mK	114,7 W/mK
Dureza	91HB	110HB

Como o zamac-8 possui intervalo de fusão mais elevado que o zamac-5, pode-se trabalhar no processo de injeção a temperaturas normais de processamento do polímero, afastando a possibilidade de fluência (CALLISTER, 1994) e minimizando os riscos de contaminação do injetado (BARETA *et al.*, 2006).

Com uma condutividade térmica maior, procura-se diminuir o tempo do ciclo de injeção. A boa condutividade térmica dos metais garante uma retirada uniforme de calor do sistema, que também influenciará na qualidade do injetado (MENGES *et al.*, 1999).

O zamac-8 possui as melhores características físico-mecânicas encontradas nos zamacs comercializados no Brasil, com o mesmo preço de aquisição por quilo, do zamac-5 (ALPHA, 2005). Por ser menos denso que o zamac-5, isto implica um custo menor de aquisição para um mesmo volume de material.

Assim, decidiu-se realizar um ensaio por experimentação, de um molde-protótipo confeccionado em zamac-8, comparando-o ao molde produzido em aço 1045. E ainda comparar as características físico-mecânicas dos moldados em moldes de zamac-8 e aço 1045.

3.1.2 Escolha do aço 1045 como material de molde

Na seção 2.4 há a indicação, para uma baixa produção de moldados, da utilização do aço SAE 1045. Nesta indicação, usa-se o aço sem tratamento térmico ou superficial. A escolha do aço foi devido a ele apresentar as melhores características nos moldados, conforme pôde ser visto. O aço 1045, escolhido por ser uma liga comercial, encontrada facilmente no comércio. Sendo um material de uso corrente na ferramentaria, o aço 1045 também está bem caracterizado como material e em são bem definidos seus parâmetros de usinagem (CHIAVERINI,1986). As características mecânicas do aço 1045 podem ser observadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Características mecânicas do aço SAE 1045 laminado e normalizado (adaptado de GERDAU, 2011).

Material	Aço 1045
Intervalo de Fusão (<i>solidus-liquidus</i>)	1440°C a 1530 ° C
Alongamento	28%
Condutibilidade Térmica	52,9 W/mK
Dureza	130HB – 175HB

Definidos os materiais de molde, aço 1045 e zamac-8, passou-se à sua confecção. Segue-se a descrição.

3.2 Fundição do lingote

No laboratório de tratamento térmico da UTFPR, fundiu-se no forno elétrico Quimis modelo O.316.35P, com resolução de temperatura de 10°C, da temperatura ambiente a 1200°C, um lingote comercial de zamac-8 da empresa ALPHA Galvão-química.

A temperatura escolhida para a fundição foi de 500°C marcados no reostato daquele aparelho. Escolheu-se esta temperatura como garantia de fundição, por ser aquele um aparelho relativamente antigo.

O cadinho e o molde para o blanche, em aço 1020, foram utilizados pela primeira vez neste ensaio, garantindo que não haveriam contaminações indesejáveis da liga a ser analisada.

Seu tamanho foi definido para fundir o material zamac e fornecer um blanche nas medidas próximas à de seu usono porta-molde, 180mm X 130mm X 21,3mm pela cavidade. E 180mm X 130mm X 48,3mm pelo macho.

O blanche pode ser observado na Figura 3.2:



Figura 3.2 - Blanche fundido no laboratório de materiais da UTFPR, para ensaio de usinagem.

Depois de sua fundição, este blanque foi resfriado, mergulhando-se em água à temperatura ambiente.

O peso do bloco foi de 2.308,00 gramas, medidos na balança Toledo modelo PR1X4 com resolução de dois gramas, aferida em 2010 pelo INMETRO.

A microestrutura deste material foi analisada no laboratório de metalografia/microscopia da UTFPR. Esta análise foi realizada sobre uma amostra da matéria-prima, como recebida e também em uma amostra fundida e resfriada em água.

A superfície da amostra, primeiramente foi lixada manualmente, com lixas d'água *mesh* 600, 800 e 1000 e após teve sua superfície polida com alumina. Medida sua rugosidade, foi atacada com Nital a 2% e observada ao microscópio Carl Zeiss Jena, modelo Jenavert MHP 160NS.

As durezas foram medidas na matéria-prima e no material fundido e resfriado em água. Estas medidas foram feitas no durômetro EMCO-TEST MAC 025 G3M, do Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos da UTFPR.

3.3 Projeto das Cavidades para os Moldes-Protótipo

Dentro do conjunto de normas ASTM, haviam várias possibilidades de tipos de corpos de prova em polímeros destinados a diferentes testes. Buscaram-se os ensaios com corpos de prova de geometria mais simples, que proporcionassem uma fácil fabricação e extração do moldado, mas que fornecessem maiores informações possíveis em seus ensaios.

Esta escolha se deve a indicação de Queirós (2005) da simplificação do projeto CAD-3D para simulação CAE, evitando as análises de grau de detalhes desnecessários. Isso serve para que a simulação de processos nas práticas de projeto, não signifique aumento no tempo de projeto.

Assim, optou-se pelo ensaio de tração, normas ASTM D-638/03 tipo IV (Figura 3.3). As cotas presentes na figura 3.3 estão especificadas, juntamente com suas tolerâncias, na Tabela 3.4. Essas medições abrangem algumas das principais características do material.

Além disso, a geometria utilizada é simples, de fácil fabricação e injeção. As contrações do injetado foram levadas em consideração. Principalmente no corpo de prova de tração, que apresenta tolerâncias mais apertadas, a contração do material pode levar a não-observância das medidas padrões, estipuladas na norma.

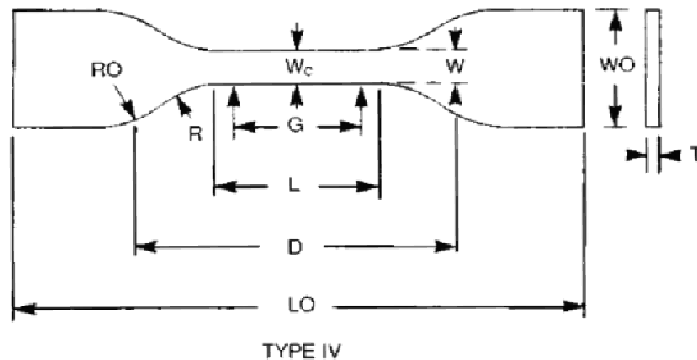


Figura 3.3 - Corpo de prova de tração, segundo norma ASTM D-638

Tabela 3.4 - Medidas e tolerâncias do corpo de prova tipo IV segundo norma ASTM D638/03 e levando-se em consideração a contração do material (SACCHELLI, 2007).

Cota	Medidas (mm)	Tolerância (mm)
W	6	±0,5
L	33	±0,5
W0	19	+6,4
L0	115	Sem limite superior
G	25	±0,13
D	65	±5
R	14	±1
R0	25	±1
T	3,2	±0,4
Wc	W	0 a -0,1

Também foi definida a norma ASTM D-790/03 de flexão, que permitem obter diretamente a tensão de escoamento. Segundo esta norma, para termofixos ou termoplásticos, um corpo de prova para este ensaio terá as dimensões 127mm, 12,7mm e 3,2mm. Com geometria simples, a norma não indica nenhuma tolerância.

3.4 Projeto e Fabricação dos Insertos

As seções seguintes detalham o projeto e fabricação das cavidades.

3.4.1 Projeto em CAD

O *software* utilizado para geração dos modelos geométricos foi o SolidWorks, 2009, da Dassault Systèmes. A partir destes sólidos, obtiveram-se as cavidades dos insertos, incorporando na sua geometria as normas ASTM de tração e flexão.

Visando estudos futuros do NUFER, estas cavidades foram projetadas para serem universais, incorporando na sua geometria as normas ASTM, de tração e flexão.

Neste sentido, levando-se em conta os índices de contração de materiais poliméricos, tipo ABS (1%), Polipropileno (1,7%), Polietileno de Baixa Densidade (1,5%), Polietileno de Alta Densidade (2,8%), com temperaturas do molde entre 20° e 60°C (PETROPOL, 2010) e as tolerâncias da norma de tração, o valor adotado foi de 3% de contração.

Também, na espessura deste corpo de prova, foi previsto um ângulo de 2°, para facilitar a extração do moldado.

Os canais de alimentação foram desenhados para terem curvas com raios maiores possíveis, evitando mudanças abruptas de direção, como indicado por Glanvill e Denton (1994). Estes modelos podem ser observados na Figura 3.4.

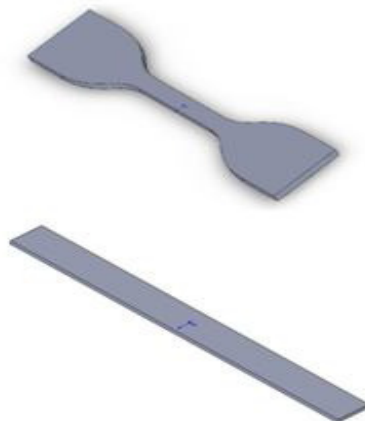


Figura 3.4 - Modelos sólidos em CAD dos corpos de prova de tração ASTM D638 – 03 e corpo de prova de flexão ASTM D790 – 03, respectivamente.

Devido as dimensões dos corpos de prova, o inserto foi projetado para o alojamento num porta-molde, existente no Laboratório de Processamento de Polímeros da UTFPR, nas dimensões de 180mm por 130mm, com 21,3mm de profundidade na parte da cavidade e 48,3mm no lado do macho.

Este porta-molde foi projetado e fabricado pelo NUFER (Núcleo de Prototipagem e Ferramental Rápido) da UTFPR, para ser utilizado em suas pesquisas na área de injeção de plástico em moldes-protótipo.

Suas características são da utilização de insertos de tamanhos variados e a possibilidade de se posicionar os extratores de acordo com a necessidade, segundo uma matriz de furos que contém a placa suporte (AMORIM, 2006), flexibilizando a produção do inserto.

A fixação do inserto, neste porta-molde, é por parafuso e arruela T, com esta arruela apoiando-se nos rebaxos laterais do inserto. A bucha de injeção é posicionada na parte do macho, de forma que a parte da cavidade é móvel, é nela que serão feitas todas as usinagens dos corpos, pontos de injeção e canais.

Foi previsto também em projeto, na cavidade, uma chave seletora de fluxo (disco central no molde, Figura 3.5).

Esta chave permite três direções de fluxo de material fundido, podendo-se então obter corpos de prova somente para tração, somente para flexão ou para ambos.

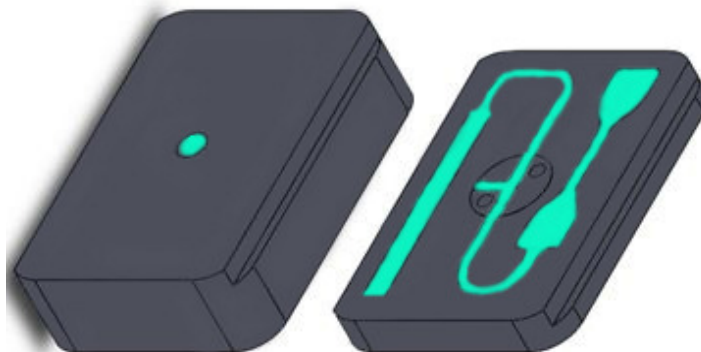


Figura 3.5 – Modelos CAD dos insertos em sua versão final, com destaque para as cavidades projetadas.

Não foram previstos canais de refrigeração no molde, porque o porta-molde não está preparado para tal e em função da aplicação pretendida (fabricação de poucas peças) Há apenas um único pino extrator no centro do molde, para facilitar a extração manual do moldado.

Com o layout externo dos insertos e as geometrias das cavidades definidas, passou-se para o projeto dos canais de distribuição e pontos de injeção.

Sobre os canais de distribuição Glanvill e Denton (1994), além de Menges *et al.* (2001) e Rosato *et al.* (2000), sugerem a opção pelo canal circular. Esta geometria permite uma menor área de contato entre o canal e o fluxo de material, diminuindo a perda de calor e de pressão sobre o fundido.

No entanto, esta geometria tem a desvantagem de necessitar de usinagem em ambos os lados do molde.

Buscando alternativas, para simplificação do projeto do molde, aqueles autores indicavam duas possibilidades: um canal trapezoidal ou um canal de meia circunferência, também conhecido como meia-cana.

O canal trapezoidal apresenta uma menor perda de pressão, no entanto sua geometria é mais complexa de ser usinada (incluindo paredes inclinadas, arredondamento de cantos na superfície inferior). Então, optou-se pela forma do canal em meia-cana, que se mostrou mais adequada. O canal em meia-cana apresenta uma geometria simples, possível de ser usinada com passes de uma fresa de ponta esférica.

Decidida a geometria do canal, necessitava-se saber o diâmetro do mesmo. Os comprimentos dos canais no molde têm 120mm. Quanto a esta dimensão, Innova (2010) indica um diâmetro circular de 6,3mm, para canais com comprimentos entre 76,2mm a 152mm.

Este mesmo estudo mostra uma medida equivalente de 5,61mm de diâmetro para canais localizados apenas em um lado da partição do molde.

Por razões de fabricação e disponibilidade de uma fresa de topo esférico com 5mm de diâmetro, foi adotado este valor para diâmetro do canal.

O ponto de injeção foi definido, segundo as indicações de Glanvill e Denton (1994) e Menges *et al.* (2001). Ambos fornecem várias opções de pontos de injeção, mas concordam em que, para o caso de um corpo alongado e de pouca espessura, o ponto de injeção indicado é o do tipo leque.

Apresentando um fluxo de material melhor distribuído, minimizando as marcas de fluxo e diminuindo o efeito da orientação (GLANVILL e DENTON, 1994), característica desejável em um corpo de prova.

Por fim, definiu-se a posição dos pontos de injeção, colocados no sentido em que o fluxo do material fundido percorresse a maior distância possível sem obstáculos ou mudança de direção.

Esta posição foi a centralizada nas extremidades dos corpos de prova. Esta definição também permitiu a utilização de raios generosos na mudança de direção do canal.

Esta característica foi adotada para se diminuir a resistência do fluxo de material em canais estreitos (MENGES *et al.*, 2001), conforme Figura 3.6.



Figura 3.6 – Modelos CAD das cavidades, canais de injeção e bicos de injeção.

3.4.2 Análise em CAE

Para simulação do processo de injeção utilizou-se o *software* Moldex3D da Coretech System Co. LTd do Laboratório de Processamento de Polímeros da UTFPR. Um balanceamento do molde foi realizado, assim como a análise de preenchimento das cavidades.

O balanceamento é importante para minimizar o momento que pode ser gerado pelas pressões de injeção durante o preenchimento do molde e analisar o fluxo do material dentro do molde, evitando seu turbilhonamento (ROSATO *et al*, 2000).

As informações de materiais de molde e moldado os próprios da biblioteca do *software*. Por não serem previstos canais de refrigeração nos moldes, as análises foram somente dos coeficientes de transferência de calor entre o moldado e o molde, em aço 1045 e zamac-8, segundo a arquitetura de análise do programa Moldex3D.

Os valores iniciais de processamento indicados na análise de preenchimento do molde, podem melhor ser observados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros de injeção indicados pelo software Moldex3D.

Tempo de preenchimento	3,2s
Máxima pressão de injeção	18,72MPa
Máxima carga de fechamento	4,78ton
Temperatura de processamento do polímero	180 °C
Temperatura inicial do molde na injeção	30 °C
Temperatura ambiente	20 °C

3.4.3 Processo em CAM

Dois pares de insertos, com geometrias idênticas foram fabricados, um em zamac-8 e outro em aço SAE 1045.

Para a definição de ferramentas, das estratégias de usinagens, dos parâmetros de usinagem e simulação de usinagem, foi utilizado sistema CAM Powermill, da Delcan, no Laboratório de Usinagem CNC da UTFPR. Os dados de corte utilizados para o aço SAE 1045 foram aproximados pela indicação de Sandvik (2000), no entanto foram utilizados parâmetros mais conservadores para reduzir o desgaste das ferramentas. Os parâmetros usados para a usinagem do zamac-8 foram os indicados para usinagem do alumínio. As ferramentas utilizadas em ambos os insertos estão listadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Lista de ferramentas de usinagem definidas para fabricação dos insertos.

Ferramenta	Sigla	Material	Diâmetro (mm.)	N° de facas
Cabeçote de faceamento	CAB100	Pastilha de Metal Duro	100	6
Cabeçote de canto reto	CAB50	Pastilha de Metal Duro	50	5
Fresa de topo reto	FT10	Metal Duro	10	2
Fresa de topo reto	FT4	Aço Rápido	4	2
Fresa de topo esférico	FB5	Metal Duro	5	2
Fresa de topo reto	FT2	Aço Rápido	2	2
Broca de centro	BRCt	Aço Rápido	6	2
Broca	BR3,5	Aço Rápido	3,5	2
Broca	BR5	Aço Rápido	5	2
Broca	BR8	Aço Rápido	8	2
Broca	BR12	Aço Rápido	12	2
Broca	BR16	Aço Rápido	16	2
Alargador	AL4	Aço Rápido	4	8
Alargador	AL16	Aço Rápido	16	8

Como regra, para os acabamentos, foi mantida constante a rotação e reduzidas pela metade os avanços. As estratégias adotadas foram as mesmas para os dois insertos, variando-se os parâmetros de usinagem.

O faceamento e esquadreamento dos blocos foram executados com a ferramenta CAB100, deixando-os na dimensão final, sem sobre-material.

Para o contorno externo do macho (arredondamento dos cantos), foi utilizado a estratégia de *3D Offset* para o desbaste e *Z Constante* para o acabamento, utilizando a ferramenta CAB50.

O furo para a bucha de injeção, com uma broca de centro, seguida de broca de 5 mm, após uma com 8 mm, 12 mm, 15 mm. e, por fim, o alargador de 16 mm. A Figura 3.7 ilustra a etapa de fresamento do contorno na programação do processo CAM.

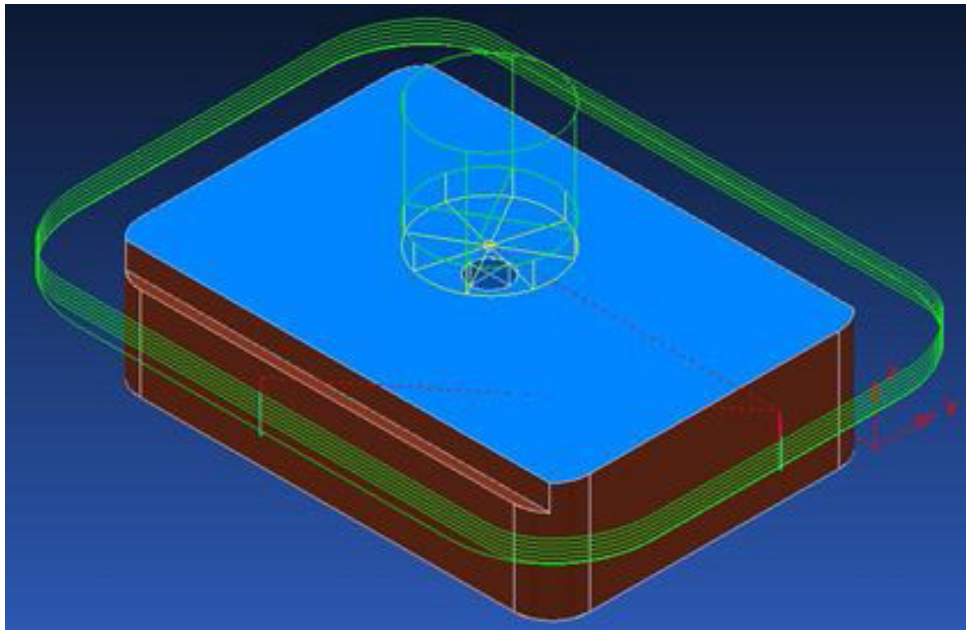


Figura 3.7 – Programação em Powermill para a fabricação do macho, em verde estratégia de desbaste *3D Offset*.

Para o contorno externo da cavidade, utilizando a estratégia de *3D Offset* para o desbaste e *Z Constante* para o acabamento, foi utilizada a ferramenta CAB50.

O desbaste das cavidades, utilizando a ferramenta FT10 e uma estratégia *3D Offset*. Em seguida, foi usinada a séde para a chave seletora com a mesma ferramenta, utilizando uma estratégia *Z Constante Otimizado*.

Com esta mesma estratégia, mas usando a ferramenta FT4, foi executado um pré-acabamento e depois o acabamento das cavidades dos corpos de prova.

Os canais e pontos de injeção foram desbastados com a ferramenta FB5 e estratégias de *3D Offset*. Para o acabamento do ponto de injeção, que tem a mesma dimensão final que a fresa FB5, foi utilizado apenas um passe da ferramenta para evitar marcas de usinagem, retirando o sobrematerial deixado pelo desbaste em uma única vez.

O acabamento do ponto de injeção se deu com um passe inicial com a ferramenta FB5 e, em seguida, com a fresa FT2, utilizando *Z Constante Otimizado*. Por fim, a furação para os parafusos de fixação da chave seletora, com uma broca de 3,5 mm e para o pino de extração central, com broca de 3,5mm e alargador de 4mm. A Figura 3.8, mostra a programação da usinagem da cavidade.

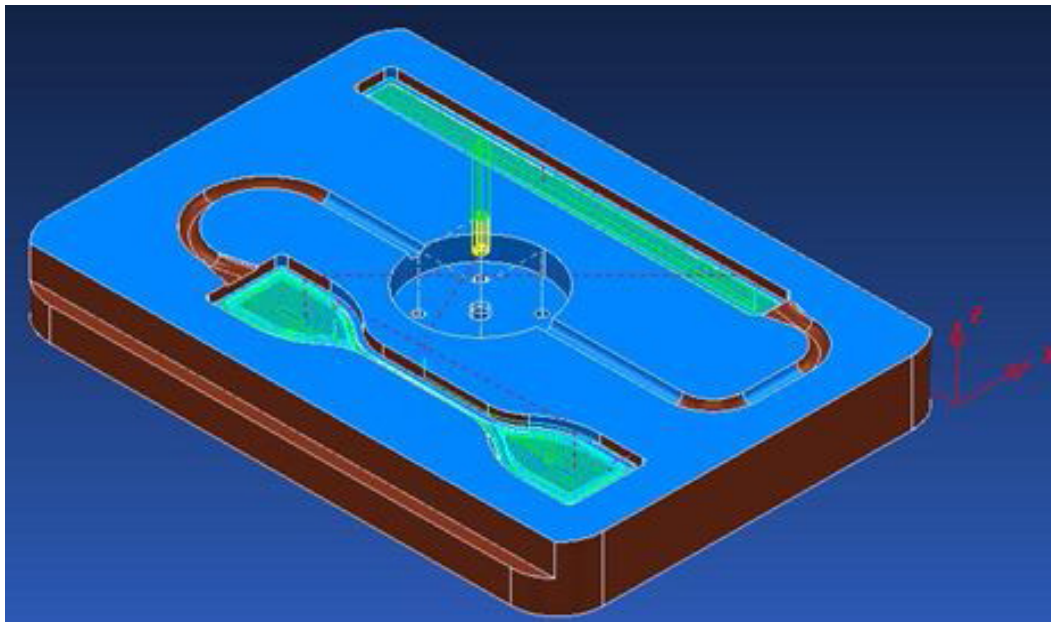


Figura 3.8 - Programação em Powermill da usinagem da cavidade, em verde o acabamento das cavidades com geometria dos corpos de prova.

A última peça processada foi a chave seletora. Utilizando a ferramenta CAB50, desbastando com estratégia *3D Offset* e tendo seu acabamento executado através de um percurso com *Z Constante*.

Em seguida, os canais foram usinados com a fresa FB5, da mesma forma que os canais da cavidade.

As furações para encaixe dos parafusos foram feitas com broca de centro seguida de uma broca de 5 mm.

O furo para a passagem do pino de extração foi feito com broca de centro, broca de 3,5mm e alargador de 4mm.

Os rebaixos para o alojamento das cabeças dos parafusos e o poço frio foram realizados com a ferramenta FT4. A Figura 3.9 mostra a programação da usinagem da chave seletora.

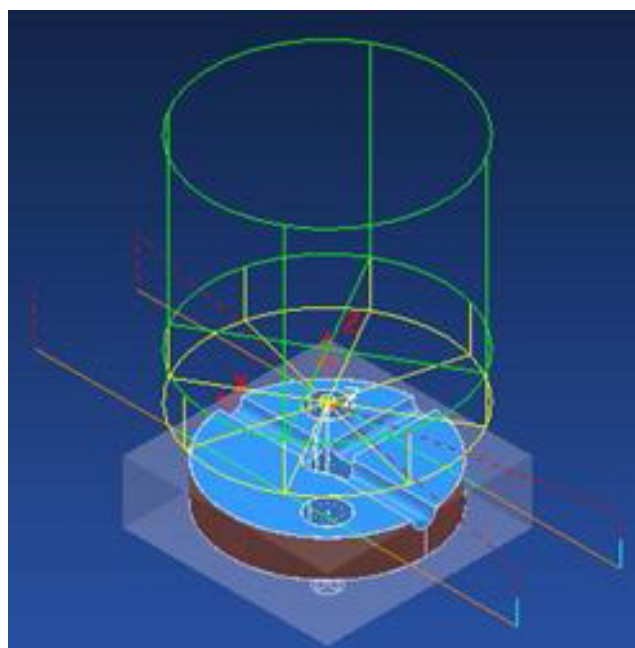


Figura 3.9 - Programação em Powermill da usinagem da chave seletora.

A Tabela 3.7, informa os parâmetros selecionados para a usinagem dos insertos.

Tabela 3.7: Parâmetros de corte e de desbaste utilizados: rotação (n), avanço (f), profundidade de corte (Ap).

Ferramenta	Aço SAE 1045			Zamac-8		
	n (rpm)	f (mm/min.)	Ap (mm)	n (rpm)	f (mm/min.)	Ap (mm)
CAB100	800	250	0,5	300	250	1
CAB50	1600	300	0,5	600	300	0,5
FT10	1800	150	0,4	800	200	0,5
FT4	200	200	0,3	2000	200	0,4
FB5	1600	75	0,2	1600	100	0,3
FT2	2800	150	0,2	/	/	/
BRCt	1600	40	/	/	/	/
BR3,5	1800	30	/	900	45	/
BR5	1200	30	/	700	45	/
BR8	800	30	/	/	/	/
BR12	500	30	/	300	60	/
BR16	500	30	/	250	60	/
AL4	2500	15	/	1600	45	/
AL16	800	15	/	400	45	/

3.4.4 Usinagem dos insertos

Após a programação em CAM da usinagem, os programas contendo os dados para a fabricação dos insertos foram passados, através de um dispositivo DNC (*Direct Numerical Control*) para o controle do centro de usinagem CNC Cincinnati Milacron Arrow 500, do Laboratório de Usinagem CNC da UTFPR. Para fabricação dos insertos em aço 1045 e zamac-8, foram cronometrados seus tempos a partir do início de suas usinagens.

A usinagem do inserto em zamac-8 foi a seco, evitando-se a contaminação dos cavacos por fluídos lubi-refrigerante.

Com os insertos usinados, foram feitos os ajustes e polimento das cavidades. O ajuste tem a função de corrigir erros na parte externa dos insertos que impeçam os mesmos de entrarem corretamente em seus alojamentos no porta-molde. Este ajuste foi realizado com lixas de granulação *mesh* 80. Após o ajuste,

passou-se ao polimento das cavidades e canais de alimentação, com o objetivo de conferir melhor acabamento superficial e retirar marcas de usinagem. Nos insertos de aço, iniciou-se o polimento com lixa *mesh* 600, em seguida utilizou-se lixa 1200, 2500 e pasta de diamante. No caso dos insertos em zamac-8, foram utilizadas para o polimento, lixas *mesh* 1200, 2500 e pasta de diamante. O acabamento também teve seus tempos cronometrados.

Após a usinagem e acabamento, foram feitas a média de três medições da rugosidade superficial. Utilizou-se o rugosímetro de superfície, digital, modelo 2P-200 Instrutherm com captador indutivo, do laboratório de plasma da UTFPR.

3.5 Ensaio de Reciclagem

A reciclagem do material, tanto usinado (na forma de cavacos ou aparas), quanto do molde propriamente dito, é interessante do ponto de vista econômico, pois reduz a quantidade de material que precisa ser adquirido e do ponto de vista ambiental, já que reduz quantidade de passivos produzidos e o desperdício de material.

Assim, no estudo do zamac-8 como material alternativo para a construção de moldes-protótipo, um ponto importante é a tentativa de reutilização dos restos de usinagem (cavacos e aparas de zamac), gerados durante a fabricação do blanche de usinagem.

Como citado, antes dos testes de usinagem a fresadora utilizada e a área próxima a ela foram preparadas para o recolhimento do cavaco. Assim, os restos provenientes dos testes estariam praticamente livres de contaminação por outros materiais.

Originalmente, o blanche possuía 2308 gramas. O cavaco recolhido foi então levado ao forno elétrico Quimis, utilizando-se os mesmos procedimentos usados para a obtenção do blanche para a usinagem dos moldes, conforme Figura 3.10.



Figura 3.10 - Cadinho de aço utilizado para a fundição do cavaco de zamac-8.

Desta forma, restou saber se estas qualidades são impressas num produto injetado, através da continuação do estudo e análise do seu injetado, já que o material zamac-8, aqui se mostrou promissor como material para molde-protótipo.

A seguir, ver-se-á a definição das cavidades a serem usinadas em um molde de zamac-8 e outra igual em aço 1045, suas características, fabricação dos moldes e a aplicação no processo de injeção.

3.6 Injeção dos Corpos de Prova

As condições ambientais dos ensaios de injeção não eram as definidas pela análise CAE. Ao lado do Laboratório de Processamento de Polímeros há o Laboratório de Metrologia da UTFPR, onde um termômetro de precisão indicava uma temperatura ambiente de 4°C no momento da injeção.

As temperaturas das cavidades foram monitoradas com um termômetro infravermelho, marca Cummins Modelo 6534, com campo de medição de -20°C a 200°C e erro de medição 2,5°C. Este termômetro indicava uma temperatura, na cavidade, entre 9°C e 10°C no momento do ensaio. As análises de elementos finitos indicavam uma temperatura de 30°C para a cavidade e 20°C para o ambiente.

Buscando reduzir o efeito da temperatura no molde, utilizou-se de um soprador térmico (conhecido como pistola de calor) marca Makita HG5012K

Profissional, de 1600W de potência e regulagem de temperatura para 350°C a 500°C das Oficinas de Marcenaria da UTFPR.

Após cerca de 45 minutos de esforços para aquecer o molde, com regulagem em 500°C, esta atitude mostrou-se ineficaz, pois ao longo deste tempo, houve um aumento de temperatura de apenas 0,8°C na cavidade do molde. Decidiu-se então pelo abandono dos critérios indicados pelo *software* Moldex3D e continuação do ensaio pela técnica de *short-shot* (BARRY *et al.*, 1995). Esta técnica se faz pela análise da variação de parâmetros de injeção iniciais até a extração do moldado com qualidade.

Neste trabalho foi utilizado como material injetado, o polipropileno isotático CP204, marca Brasken, com temperatura de fusão de 163°C. Este material foi escolhido para este estudo por possuir boas características de processabilidade e de dureza, possuindo ainda uma estabilidade dimensional satisfatória e por ter um consumo mundial representativo.

O polipropileno foi secado em estufa a 90°C, durante quatro horas. As injeções foram realizadas na injetora horizontal Haitian TF-58X, do Laboratório de Processamento de Polímeros, da UTFPR. Dos valores iniciais de processamento, fornecidos pelo fabricante, variou-se os mesmos até a extração do injetados com qualidade. A partir do 1º injetado com qualidade, foram extraídas 50 peças com qualidade geométrica de cada molde. Estas peças foram medidas, com o auxílio de paquímetro Mitutoyo de 150mm e resolução de 0,02mm.

Para efeito de comparação, uma vez identificados os parâmetros de injeção para os moldes de aço e zinco, os ensaios foram repetidos aplicando-se os parâmetros de injeção cruzados ou seja, os parâmetros do molde de aço no molde de zinco e vice-versa.

3.7 Ensaios Físicos e Mecânicos dos Corpos de Prova

Das peças injetadas, foram selecionadas 7 de cada molde, ao acaso, para realização do ensaio de tração e mais 7 de cada molde para o ensaio de flexão. Amostras também foram selecionadas ao acaso, para a análise de MEV-EDS e DSC. A seguir apresenta-se a descrição destes ensaios.

3.7.1 Ensaio de flexão

A norma ASTM D-790/03 define o ensaio de flexão com 3 pontos de apoio para polímeros. Indica ainda que para termofixos, o ensaio ocorre até a ruptura do corpo de prova e para termoplásticos, ocorre até uma deformação de 5%. Para o ensaio de flexão foi utilizada uma velocidade de 76,2mm/min e 25mm entre apoios. Este ensaio foi realizado na máquina de ensaio para polímeros Mod. Sintech da USP de São Carlos. Apesar de a análise indicar uma deformação de 5%, visualizou-se o ensaio até o fim de curso.

3.7.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração consistiu na aplicação de uma carga crescente uniaxial, a uma velocidade de 5,08mm/min, conforme a norma ASTM D-638 tipo IV. Esta velocidade é indicada para polímeros rígidos e semi-rígidos, com até 14mm de espessura. Este ensaio foi realizado na máquina de ensaio para polímeros Mod. Sintech da USP de São Carlos.

3.7.3 Análise de MEV com EDS

Para verificação de possíveis contaminações, foi utilizada a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Detector de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).

Este ensaio foi realizado pelo Microscópio Eletrônico de Varredura 6460LV da Jeol no laboratório de filmes finos da Universidade de São Paulo. Os corpos analisados tiveram uma deposição de ouro em sua superfície.

O arco de plasma utilizado para esta deposição foi de 0,1mbar de argônio, tensão de 220V e corrente de 35mA. O tempo de deposição foi de 3 minutos.

3.7.4 Análise de DSC

Os ensaios de DSC, realizado no aparelho Netzsch DSC 200F3 Maia do laboratório de filmes finos da Universidade de São Paulo, foram propostos com o objetivo de analisar a alteração de Tg do injetado e sua possível contaminação.

Utilizou-se uma massa de 4mg dos moldados em aço 1045, zamac-8 e do injetado não-moldado.

A Tg do polipropileno foi relatada como sendo de -10°C . Para esta análise, deveria-se começar a rampa do aquecimento da amostra a partir de -20°C a -25°C . Este resfriamento é feito na câmara da máquina de ensaio por nitrogênio líquido.

Entretanto, no dia reservado a esta análise, esta possibilidade de resfriamento estava indisponível. Assim, optou-se pela análise da Tm dos injetados. Conforme relatado por Canevarolo (2002).

Foram feitas análises nos injetado em aço 1045, zamac-8 e ainda no injetado não-moldado. A análise do injetado não-moldado deve-se a verificação de simples conferência se o processo é capaz de alterar a Tm do polímero. Este material processado foi esfriado ao ar. A amostra para comparação neste ensaio foi o ar atmosférico.

Assim, os injetados extraídos das cavidades em aço e zamac foram acondicionados em cartuchos de papel e em caixas de papelão identificadas com o conteúdo (injetados em zamac ou aço), para evitar a contaminação do injetado por tinta de marcação, por contato em embalagem de plástico e também evitar contato com o meio ambiente durante sua manipulação, transporte e uso. Garantindo desta forma, que a calibração e varredura com o detector EDS fossem somente para os elementos de liga dos moldes de injeção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados das análises previstas no capítulo 3 e as respectivas discussões dos mesmos.

4.1 Resultados da Fundição do Zamac-8

A comparação das durezas superficiais, entre o zamac-5, zamac-8 como recebido e zamac-8 fundido e resfriado em água, podem-se observar na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Comparação de durezas médias entre o zamac-5 e o zamac-8, como recebido e fundido e resfriado em água.

Material	Dureza
Zamac-5	91HB
Zamac-8, como recebido	124HB
Zamac-8, tratado termicamente	164HB

A matéria-prima como recebida de zamac-8, possuía uma dureza maior que o zamac-5 (BARETA *et al.*, 2006). Porém, houve um ganho médio de 42 HB no zamac-8 tratado termicamente por têmpera (CALLISTER, 1994).

Este valor é maior que os 95 HB de algumas ligas de alumínio normalmente usado na confecção de moldes-protótipo (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

Este aumento na dureza, melhora a polibilidade (HARADA, 2004), além duma dureza maior garantir uma longa vida útil ao molde (SANTA'ANNA, 2009).

Observou-se a micro-estrutura do zamac-8 como recebido, Com um mesmo procedimento, foi observado o material fundido e resfriado a água. As micrografias destas estruturas podem ser observadas na Figura 4.1 e Figura 4.2.

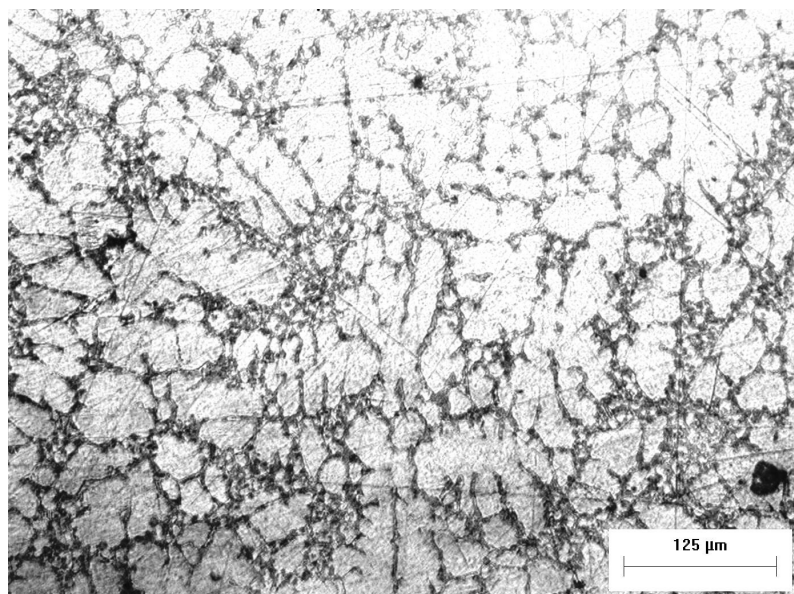


Figura 4.1 - Micrografia com ampliação de 200X da microestrutura do zamac-8, como recebido, mostrando sua homogeneidade e segregação metálica nos contornos de grãos (atacado por Nital a 2%).

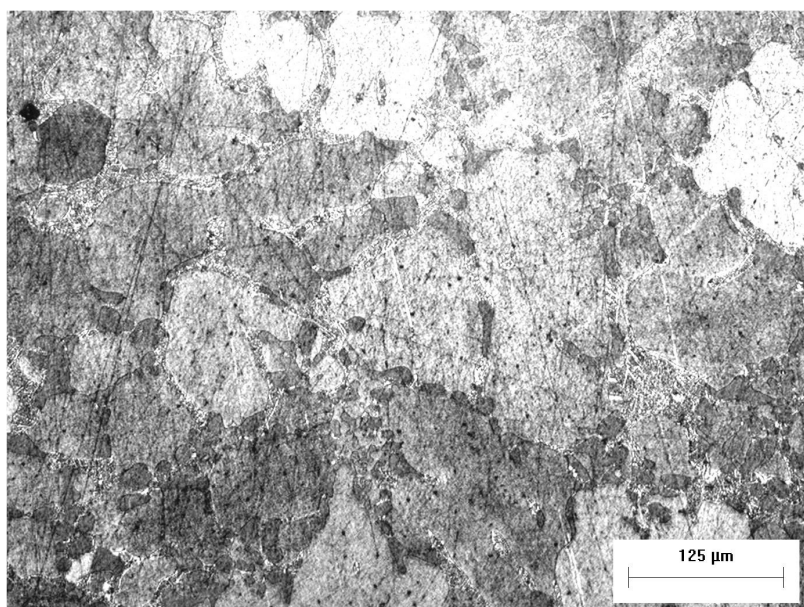


Figura 4.2 - Micrografia com ampliação de 200X da microestrutura do zamac-8 temperado, mostrando sua homogeneidade e ausência de segregação nos contornos de grãos (atacado por Nital a 2%).

Observa-se a pouca segregação de material no contorno de grão (Figura 4.2), pelo rápido resfriamento, deixando esta região com menos energia e menos

susceptível ao fenômeno de fluência ou a outros mecanismos de desgaste, como corrosão intergranular (CALLISTER, 1994).

O aparecimento de bolhas no interior do material chamou atenção para o processo de resfriamento. Com a observação deste problema (Figura 4.3), passou-se a, ao invés de mergulhar em água diretamente o material ao ser resfriado, optou-se por mergulhar o cadinho, de forma que o líquido não entrasse em contato direto com o metal, o que se mostrou uma forma eficiente de evitar o acúmulo interno de gases, como visto na usinagem do inserto.



Figura 4.3 – Destaque nos vazios surgidos no ensaio de usinagem

4.2 Resultados dos Ensaio de Usinagem do Zamac-8.

Os parâmetros de usinagem em alumínio utilizados para usinagem do inserto em zamac-8 imprimiu uma boa qualidade superficial, sem marcas de usinagem profundas ou rugosidade excessiva.

Na tabela 4.2, pode-se observar a rugosidade média (R_a) da cavidade polida em zamac-8.

Tabela 4.2 - Rugosidades médias (Ra) no polimento do zamac-8 e Desvio Padrão de 0,003.

Operação	Nº de <i>cutoff</i>	Resolução	<i>Range</i>	Ra
Polimento	5	0,25mm	+/- 80µm	0,022µm

Percebeu-se a baixa rugosidade conseguida no zamac-8 polido (conforme Tabela 4.3). Um alto grau de polimento facilita a extração da peça, pela falta de adesão e imprime um bom acabamento superficial no injetado. Este polimento foi conseguido manualmente, em cerca de 30 minutos.

4.3 Resultado da Análise de Reciclagem do Zamac-8.

Das 2.308 gramas originais do blanche, os pesos da peça final usinada e dos cavacos recolhidos do ensaio preliminar foram de 2.050 gramas. Uma perda de 8,9% da massa de zamac-8 deve-se ao fato de o espalhamento do cavaco atingir lugares não acessíveis ou, por outro lado, haver a contaminação dos cavacos pelo ambiente da usinagem.

Na reciclagem do material recolhido, nota-se que houve a fusão de parte do cavaco, no entanto a maior parcela permaneceu sólida, impossibilitando a coesão da amostra como um todo. Este efeito pode ser observado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Amostra de cavacos de zamac-8 após tentativa de fundição.

Isto se deve a possível oxidação do zinco, material mais abundante na liga de zamac-8. Segundo Brady *et al.* (2002), o zinco, em contato com o oxigênio do ar atmosférico, rapidamente oxida e forma uma película de ZnO, depositada sobre toda a superfície do material. O óxido de zinco formado possui uma temperatura de fusão de aproximadamente 1800 °C e é insolúvel em água.

Assim, com a operação de usinagem, com uma grande área de superfície apresentada pelos cavacos (relação superfície/volume), a oxidação foi potencializada, formando-se uma camada de óxidos em todo o contorno dos cavacos. Essa camada de material com ponto de fusão muito mais elevado funcionou como um isolamento entre os cavacos, impedindo a correta fusão, a aglutinação do material e gerando, no fim do processo, um corpo quebradiço, completamente fracionado. Assim, a reciclagem dos cavacos de zamac-8 através apenas de fundição não foi possível.

No entanto, a reciclagem através da re-fusão de partes maiores de material, como moldes ou outras peças menores (as aparas, por exemplo), foi perfeitamente possível e foi verificada na sua reutilização para fabricação dos insertos.

Por fim, sua usinagem a seco permite um ambiente com mais asseio e conforto ao operador da máquina. Adicionalmente, sem a utilização de meios lubrificantes, a usinagem de zamac-8, reduziu a emissão de passivos. Então, houve um ganho ambiental no uso deste material.

4.4 Resultados da Análise CAE

A geometria utilizada para os corpos de prova se revelou eficiente, de fácil e rápido projeto na sua fabricação. As análises em CAE indicaram o acerto nas decisões sobre as configurações do molde.

Na Figura 4.5, observa-se o tempo de preenchimento da cavidade em zamac-8. Vê-se que a injeção do polipropileno encerra-se aos corpos de prova em mesmo tempo. Isto demonstra um bom balanceamento do molde.

Na Figura 4.6, observa-se na análise, a ausência de linhas de solda. Estas linhas aparecem quando há a convergência de duas frentes de fluxo ou por turbilhonamento.

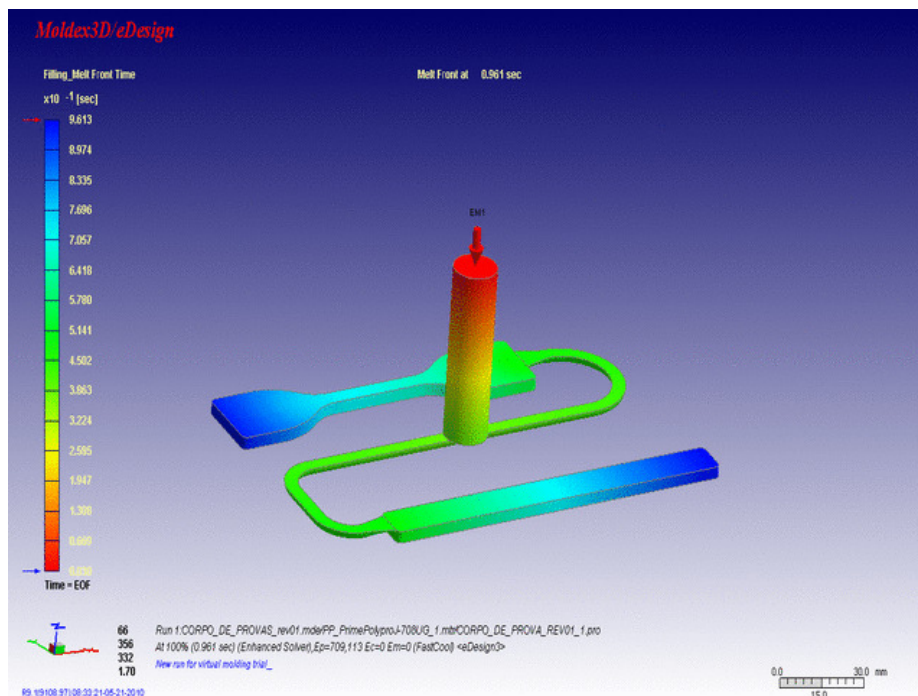


Figura 4.5 – Tempo de preenchimento da cavidade em molde de zamac-8 (escala de tempo em segundos).

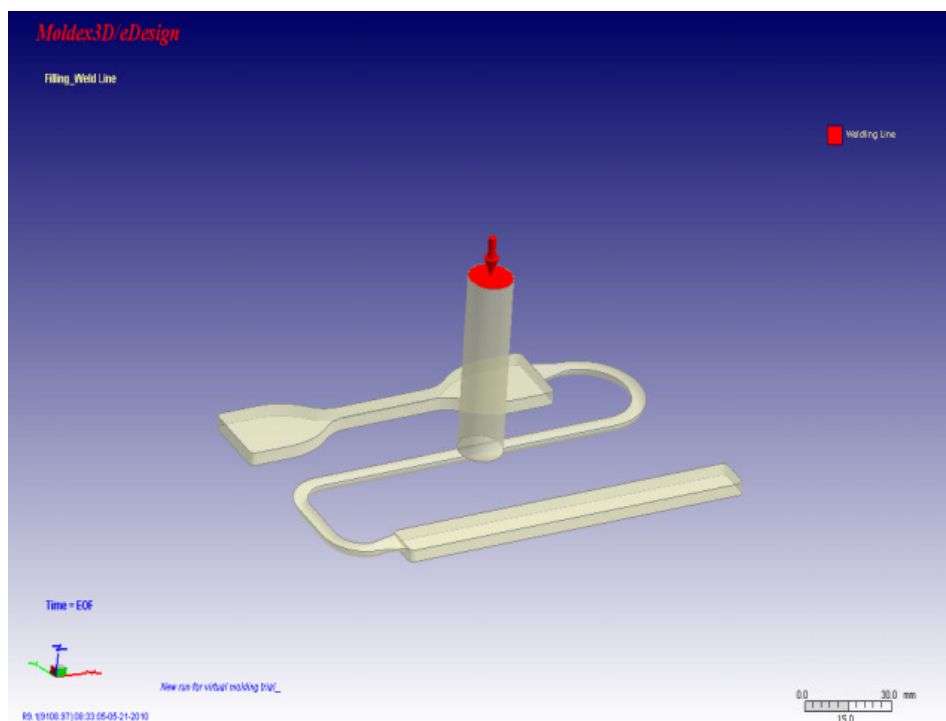


Figura 4.6 – Ausência de região com linhas de solda nos canais de injeção e cavidades.

Na Figura 4.7, observa-se a ausência de aprisionamento de gases no preenchimento das cavidades.

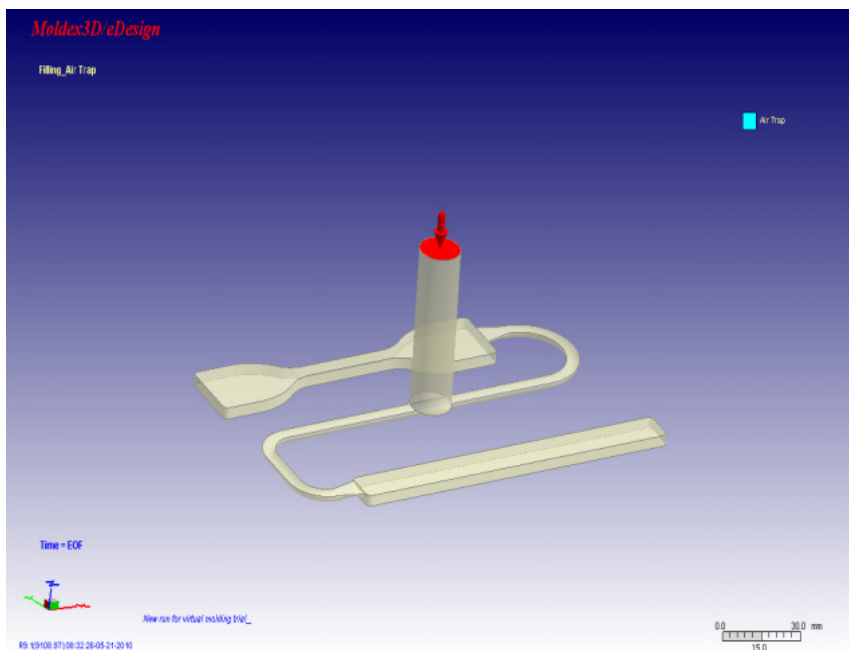


Figura 4.7 – Ausência de aprisionamento de gases no preenchimento da cavidade.

4.5 Resultado do Tempo de Obtenção da Ferramenta de Injeção

Os tempos de fabricação e acabamento dos moldes em aço 1045 e zamac-8 podem ser observados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tempos de usinagem, ajustes e acabamentos do inserto.

Material	Tempo de usinagem	Tempo de ajuste e acabamento	Tempo total
Inserto em aço	8 horas.	11 horas	19 horas
Inserto em zamac	6 horas e 30min.	6 horas	12 horas e 30 min.

Na comparação dos tempos de usinagem e acabamento dos moldes em zamac-8 com o aço 1045, houve uma redução de cerca de 34% do tempo de obtenção do molde, para uma mesma cavidade, impactando diretamente na redução dos custos de produção do molde.

Em relação à matéria-prima, para se ocupar um mesmo volume de material necessário para o alojamento do porta-inserto e ainda, para se obter uma mesma cavidade.

O zamac-8 apresentou uma relação de custo de aquisição deste material, em agosto de 2010, de R\$ 1,00 para R\$2,40 para a aquisição do material aço 1045.

4.6 Resultados dos Ciclos de Injeção

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros encontrados para o aço 1045 e a Tabela 4.5, os de zamac-8.

Tabela 4.4 - Parâmetros de injeção utilizados para o molde de aço 1045.

Temperatura ambiente	4 °C	Temperatura do molde	10 °C
Ciclo de injeção da 1 ° peça com qualidade			10
Temperatura de injeção			230 °C
Pressão de injeção			37MPa
Velocidade de injeção			19mm/s
Tempo de injeção			10s
Pressão de recalque			26MPa
Velocidade de recalque			10mm/s
Tempo de recalque			5s
Dosagem			40g
Tamanho do colchão			11,1mm
Tempo de resfriamento			20s

Tabela 4.5 - Parâmetros de injeção adequado para o molde de zamac-8.

Temperatura ambiente	4 °C	Temperatura do molde	9 °C
Ciclo de injeção da 1 ° peça com qualidade			14
Temperatura de injeção			230 °C
Pressão de injeção			47MPa
Velocidade de injeção			30mm./s
Tempo de injeção			10s
Pressão de recalque			38MPa
Velocidade de recalque			15mm./s
Tempo de recalque			10s
Dosagem			40g
Tamanho do colchão			10,3mm
Tempo de resfriamento			30s

Os parâmetros de injeção adequadas para cada molde foram encontrados pela técnica de *short-shot* (BARRY *et al.*, 1995), partindo-se de valores iniciais de processamento indicados pelo fabricante do polipropileno.

O tempo de resfriamento e de recalque foram cerca de 50 % mais longos para o molde de zamac-8 em relação ao molde de aço 1045.

Em compensação, utilizou-se uma velocidade de injeção maior e consequente preenchimento da cavidade, sendo assim, praticamente os tempos de ciclos foram os mesmos.

Precisaria-se de maiores tiragens para se fazer sentir alguma diferença em tempo, que não foi o caso.

Os moldes de zamac-8 e aço 1045 não apresentaram problemas durante a utilização no processo de injeção, assim como suas cavidades, permitindo sua reutilização para ensaio futuros.

Neste sentido, não se analisou a reciclabilidade do molde em zamac-8, pois este foi doado ao Laboratório de Processamento de Polímeros da UTFPR justamente para permitir a continuidade dos estudos.

4.7 Resultado das Injeções com Parâmetros Cruzados

Na injeção de polipropileno em molde de zamac-8, empregando-se os parâmetros encontrados para o molde de aço, não houve preenchimento da cavidade.

Os injetados no molde de aço, com parâmetros de zamac-8, apresentavam vazios. Este fato mostra que, as distintas propriedades dos materiais de confecção dos insertos, requerem parâmetros distintos de injeção e estas distinções podem afetar a qualidade do moldado.

4.8 Resultados da Geometria do Moldado

As amostras foram extraídas manualmente de suas cavidades. Na escolha aleatória dos corpos de prova injetados, os moldes em aço 1045 e zamac-8, produziram injetados com as mesmas características estéticas nos moldados.

As características dimensionais não estavam conforme as normas aplicadas. Podem-se observar estas medidas, na Tabela 4.6, para tração e suas médias e desvios padrões na Tabela 4.7.

Para flexão, as medidas estão na Tabela 4.8 e suas médias e desvios padrões na Tabela 4.9.

Na Tabela 4.10, estão as dispersões para os corpos de tração e na Tabela 4.11 as dispersões para os corpos de flexão.

Tabela 4.6 – Medidas, verificadas nos corpos de prova de tração, moldados em modes de aço e zamac, comparados as da norma ASTM D-638-03 (em mm).

Cota	Norma	Moldado em aço					Moldado em zamac				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Lo	115	115,1	115,7	115,8	115,6	116	115,9	116,1	116	115,9	116
Wo	19 ±6,4	25,1	25,2	25,3	25,16	25	25,24	25,2	25,16	25,24	25,16
Wc	6 -0,1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
T	3,2 ±0,4	3,4	3,42	3,4	3,44	3,4	3,28	3,30	3,24	3,28	3,24

Tabela 4.7 – Médias das medidas e desvios padrões agrupados, verificados nos corpos de prova de tração, moldados em modes de aço e zamac (em mm).

Cota	Moldado em aço		Moldado em zamac	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão
Lo	115,64	0,336	115,98	0,083
Wo	25,152	0,111	25,2	0,040
Wc	6	0	6	0
T	3,412	0,017	3,268	0,02

Tabela 4.8 – Medidas verificadas nos corpos de prova de flexão, moldados em modes de aço e zamac, comparados as da norma ASTM D-638-03 (em mm).

Cota	Norma	Moldado em aço					Moldado em zamac				
		corpo 1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
C	127	128,3	128,5	128,4	128,5	128	127,8	127,7	127,7	127,7	127,8
Cota	Norma	Moldado em aço					Moldado em zamac				
		corpo 1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
L	12,7	12,8	12,5	12,5	12,6	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
H	3,2	3,3	3,42	3,4	3,44	3,4	3,30	3,28	3,26	3,28	3,30

Tabela 4.9 – Médias das medidas e desvios padrões agrupados, verificadas nos corpos de prova de flexão, moldados em modes de aço e zamac (em mm).

Cota	Norma Corpo	Moldado em aço		Moldado em zamac	
		média	desvio padrão	média	desvio padrão
C	127	128,34	0,207	127,74	0,054
L	12,7	12,58	0,130	12,5	0,000
H	3,2	3,392	0,054	3,284	0,016

Tabela 4.10 – Dispersão das medidas, verificados nos corpos de prova de tração, moldados em modos de aço e zamac (em mm).

Cota	Moldado em aço			Moldado em zamac		
	média	desvio padrão	Dispersão	média	desvio padrão	Dispersão
Lo	115,64	0,336	0,29%	115,98	0,083	0,07%
Wo	25,152	0,111	0,44%	25,2	0,040	0,16%
Wc	6	0	0%	6	0	0%
T	3,412	0,017	0,49%	3,268	0,02	0,61%

Tabela 4.11 – Dispersões das medidas, verificadas nos corpos de prova de flexão, moldados em modos de aço e zamac (em mm).

Cota	Moldado em aço			Moldado em zamac		
	média	desvio padrão	Dispersão	média	desvio padrão	Dispersão
C	128,34	0,207	0,16%	127,74	0,054	0,04%
L	12,58	0,130	1,03%	12,5	0,000	0%
H	3,392	0,054	1,59%	3,284	0,016	0,48%

Estes moldados não apresentavam rexupes ou vazios. Pode-se observar o resultado de um ciclo de injeção na Figura 4.8.

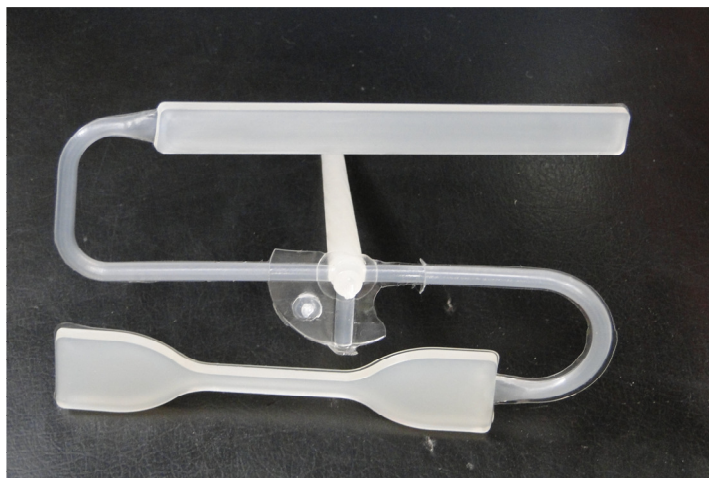


Figura 4.8 – Moldado extraído do molde de zamac-8

4.9 Análise de MEV com EDS

A análise de microscopia, que conforme mencionado anteriormente buscava avaliar a possível contaminação do injetado com elementos de liga dos materiais dos moldes utilizados e/ou metais pesados. Na varredura geral, não foram encontrados concentrações de elementos de liga no injetado em zamac-8, conforme Figura 4.9 e sua análise na Figura 4.10. Nesta análise, encontrou-se somente carbono e oxigênio aderidos a superfície (pontos claros na Figura 4.9).

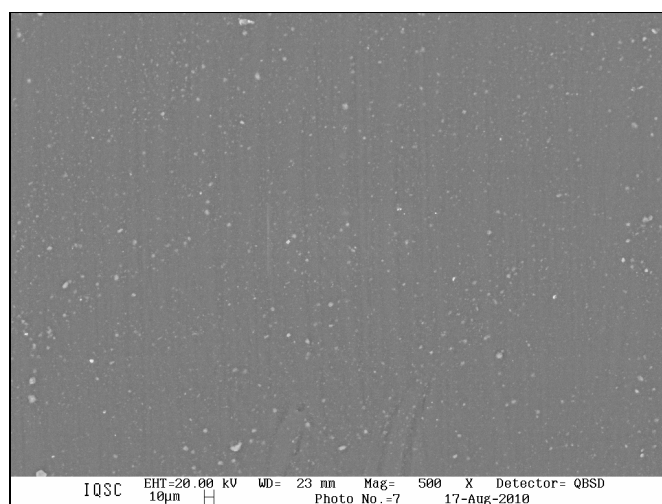


Figura 4.9 – Micrografia MEV da superfície do polipropileno moldado em zamac-8.

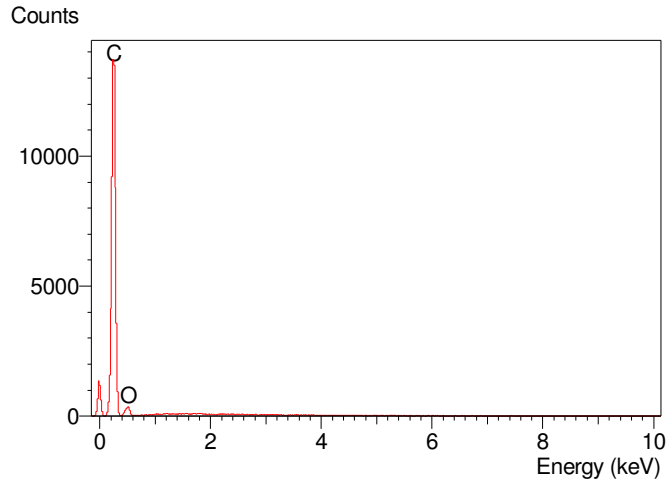


Figura 4.10 – Análise EDS superficial do polipropileno moldado em zamac-8 referente à Figura 4.9. Observa-se a presença de carbono e oxigênio

Assim, em uma varredura em resolução menor, observou-se que além das inclusões esperadas, como carbono e oxigênio, com formato globular, haviam pontos de elementos não sabidos, com formato poliédrico. Estas inclusões estavam embutidas na massa do moldado em zamac-8. O fundo cinza é a superfície do moldado e os pontos claros são as inclusões no moldado, conforme pode-se observar na figura 4.11.

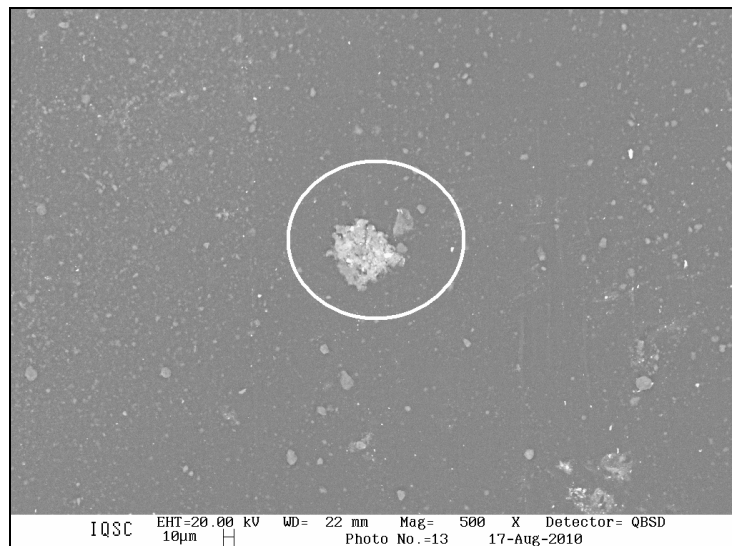


Figura 4.11 - Micrografia de MEV do corpo de prova injetado em zamac. Estão assinaladas as inclusões embutidas na massa do moldado.

Nos locais onde se encontraram estas inclusões embutidas (*clusters*), parou-se a varredura e analisaram-se os pontos (*spots*) com sensor EDS. A análise de EDS da Figura 4.11 pode ser observada na Figura 4.12.

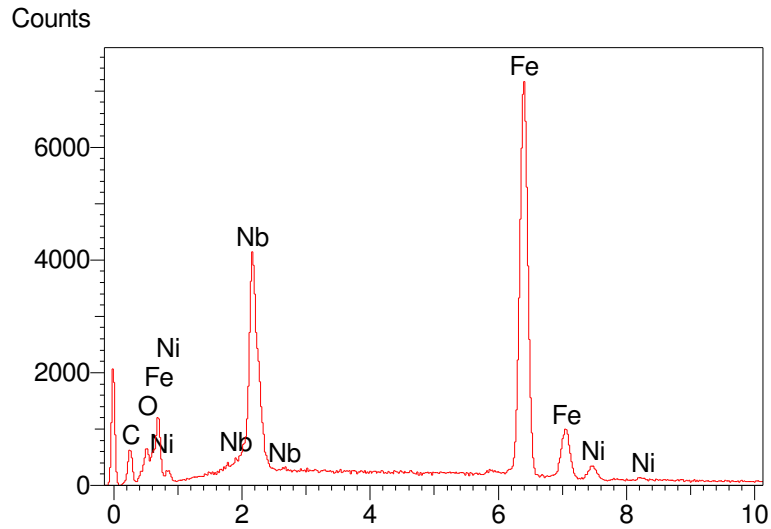


Figura 4.12 - Análise de EDS na inclusão metálica na amostra do polipropileno injetado em molde de zamac-8, referente à figura 4.

Na Figura 4.13, pode-se observar uma estrutura embutida no moldado em aço 1045. Na Figura 4.14, sua análise em EDS.

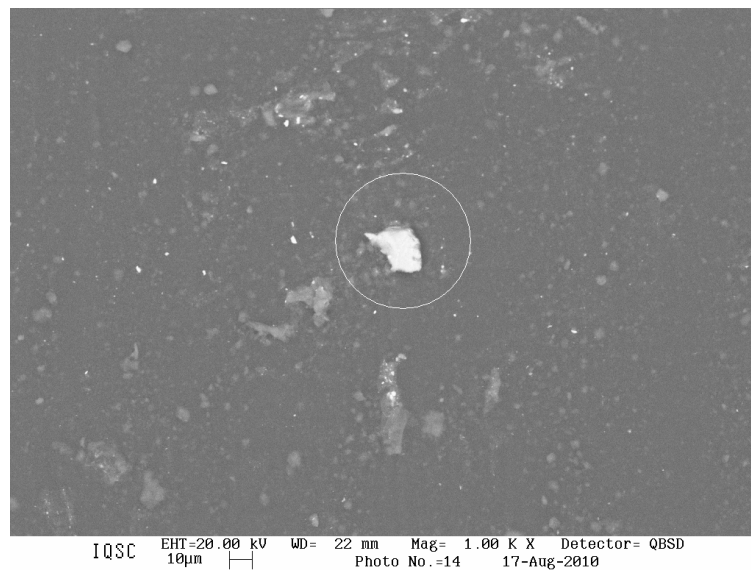


Figura 4.13 - Micrografia de MEV do polipropileno injetado em aço 1045. A forma poliédrica, em destaque, está embutida no moldado.

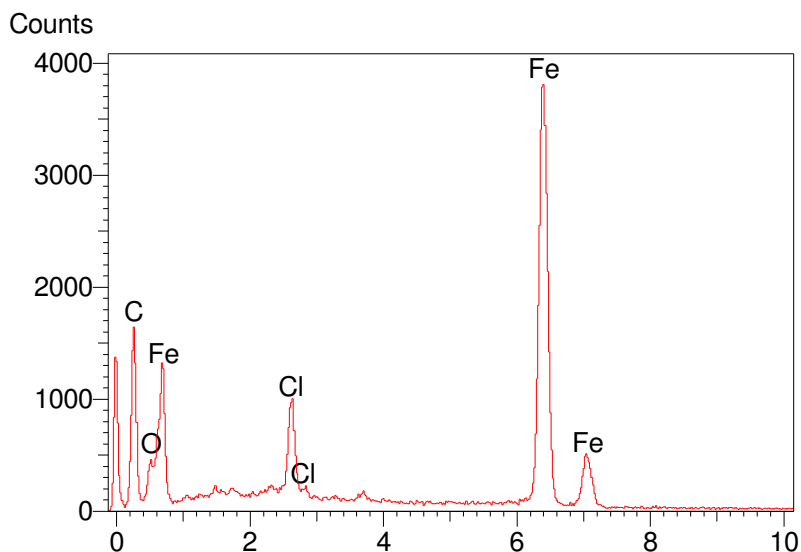


Figura 4.14 - Análise de EDS na inclusão metálica na amostra do polipropileno injetado em molde de aço 1045, referente à figura 4.13.

A análise de MEV com EDS mostrou que não houve contaminação no moldado em zamac-8 por elementos de liga do molde. As inclusões encontradas foram não-significativas para esta análise, sendo que os elementos detectados, níquel, nióbio e ferro não formam liga no molde de zamac-8.

Na análise de MEV com EDS no moldado em aço 1045, também detectou-se o ferro, que é elemento de liga no molde em aço. Entretanto, a similaridade dos picos energéticos associados, encontrados também no moldado em zamac-8, indicam uma mesma origem deste material.

As origens dos materiais destas inclusões, se foram do porta-molde, do processo ou da matéria-prima não se avaliou.

4.10 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As curvas do DSC dos materiais processados em aço 1045, zamac-8 e não-moldado, pôde-se ver na Figura 4.15.

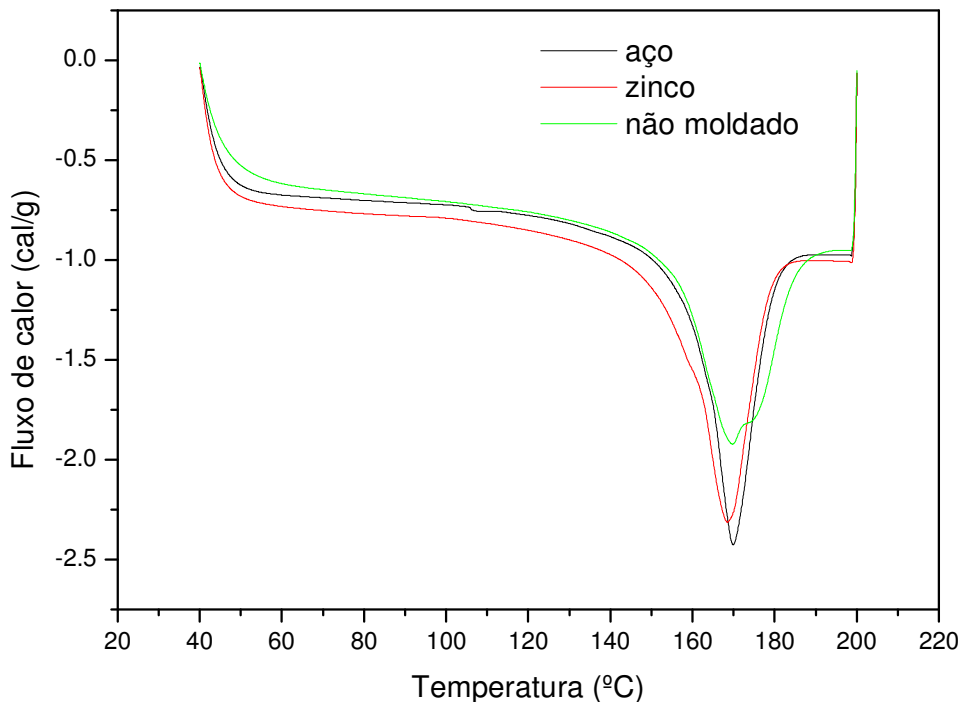


Figura 4.15 – Gráfico DSC, as derivadas das curvas antes do ponto de inflexão na curva representam as Tm dos polímeros moldados em aço, zamac-8 e injetado e não-moldado.

A Tm do polipropileno utilizado neste estudo é de 163°C. Pôde-se observar no ensaio de DSC a Tm do polipropileno moldado em aço 1045 que foi de 164°C. Uma Tm de 162°C no moldado em zamac-8 e 163°C do injetado, sem ser moldado.

O polipropileno injetado e não-moldado (resfriado ao ar atmosférico com 10°C de temperatura ambiente) conservou as características térmicas do polímero como fornecido pelo fabricante. Os moldados em aço 1045 (resfriado no molde a 10°C) e zamac-8 (resfriado no molde a 9°C) tiveram a alteração de 1°C na Tm. Estas variações são não-significativas para este estudo.

4.11 Análise do Comportamento Mecânico do Moldado

Conforme ressaltado, a comparação das resistências dos injetados em molde de zamac-8 e aço 1045 indicariam se o molde de zamac possui eficácia comparada ao molde de aço, na produção do moldado. Apresenta-se a seguir os resultados obtidos.

4.11.1 Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração para o aço e zamac-8 estão apresentados Figura 4.16.

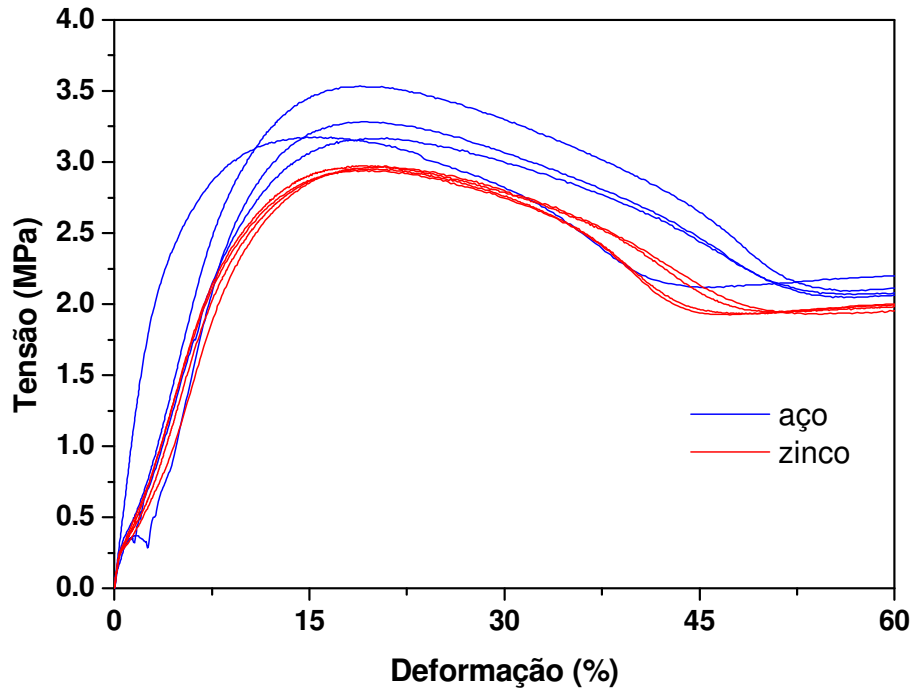


Figura 4.16 - Curvas tensão/deformação obtidas no ensaio de tração para o moldado em zamac-8 e para o moldado em aço 1045.

Pela inclinação da curva, há um comportamento similar e dúctil nos moldados, salientado por Callister (1994) na seção 2.1.2. Os resultados da análise mecânica de tração, aplicada em corpos de prova extraídos de ambos os moldes, demonstra que valores do moldado em zamac-8 são próximos ao moldado em aço 1045. Então, o módulo de elasticidade foi definido pela razão entre tensão e deformação conforme indica Callister (1994).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Assim, o módulo de elasticidade do moldado em zamac-8 foi de 0,3625 GPa e do moldado em aço 1045 foi de 0,4056GPa.

O limite de resistência à tração do injetado em molde de zamac-8 foi cerca de 8% inferior ao injetado em aço 1045. Este resultado é semelhante as diferenças de 6% dos encontrados por Baretta *et al.* (2006) no estudo do moldado de polipropileno nos pares de insertos de P-20/P-20 e P-20/zamac-5.

Percebe-se a ocorrência de uma maior repetibilidade (homogeneização) nos resultados do moldado em zamac-8, conforme se vê pela similaridade das curvas (em vermelho). Já com o moldado em aço, ocorreu uma dispersão maior das curvas (em azul).

4.11.2 Ensaio de flexão

Com o rápido resfriamento do moldado em zamac-8, pela baixa temperatura ambiente e/ou do molde, pode ter ocorrido a formação de uma pele resistente no moldado (ROSATO *et al.*, 2000).

Esta pele estava em contato direto com o material do molde (*ibidem*) no processo de injeção. Ela se formou de maneira diferenciada nos moldados. Esta diferenciação pode ter imprimido um caráter frágil no caso do moldado em zamac-8.

Com os esforços iniciais do ensaio, esta película apresentou uma resistência ao ensaio. Com a ruptura desta pele e conseqüente queda da tensão, o aparelho interrompeu prematuramente o ensaio.

Isto se deve ao fato de que a máquina utilizada para este ensaio têm a suspensão de seu funcionamento de maneira automática, em queda brusca da tensão e/ou fim de curso.

Se a máquina continuasse o ensaio, com esta interpretação, poderiam-se ter valores maiores para a curva tensão/deformação deste polímero, mas esta continuidade não foi prevista.

Observa-se na Figura 4.17, a comparação dos comportamentos dos moldados em aço 1045, com o ensaio acontecendo até o fim de curso e a interrupção dos ensaios dos moldados em zamac-8.

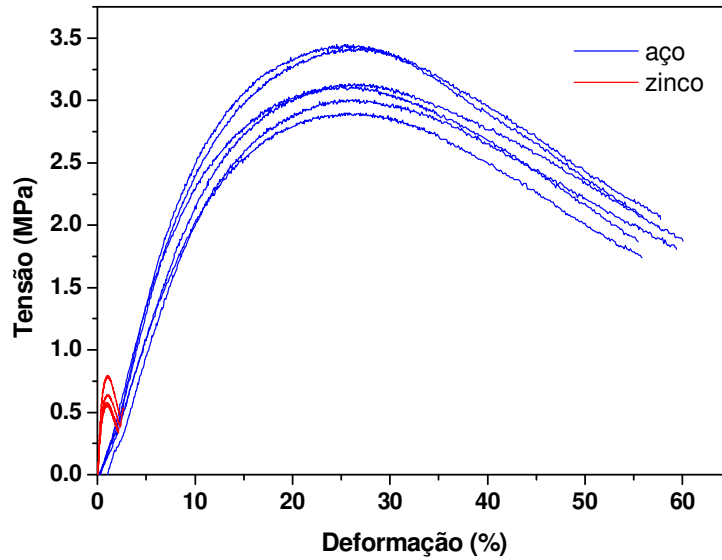


Figura 4.17 - Curvas tensão/deformação obtidas no ensaio de flexão para o moldado em zamac-8 e para o moldado em aço 1045.

A curva tensão/deformação, relativo a 5% de deformação, conforme norma pode-se observar na figura 4.18. Percebe-se melhor o caráter frágil da pele formada.

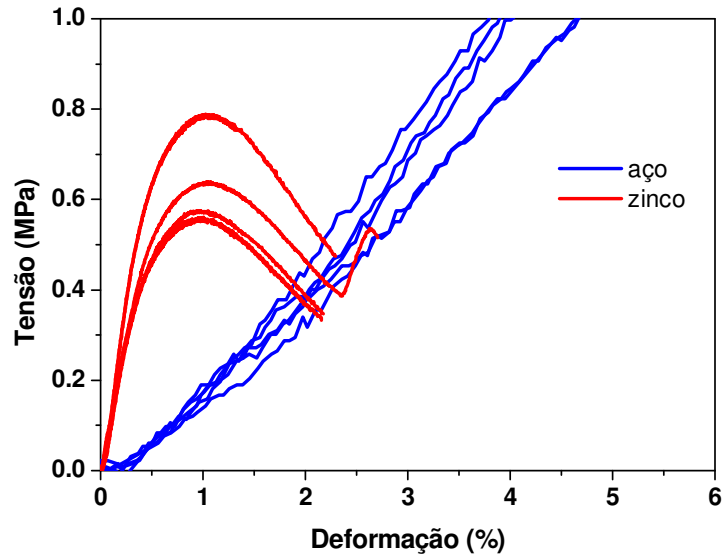


Figura 4.18 - Curvas tensão/deformação, ensaio de flexão, relativo 5%, para o moldado em zamac-8 e para o moldado em aço 1045.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões acerca deste estudo, bem como algumas considerações e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Considerações Finais

O atual desenvolvimento tecnológico na confecção de moldes aponta o fresamento CNC como um bom e eficaz processo na obtenção de moldes-protótipo. Isto se deve principalmente as vantagens do processo como de obter cavidades com boas rugosidades, diminuindo o tempo de seu acabamento.

Outra questão importante é que em CNC, conseguiu-se processar dois materiais comerciais, aço 1045 e zamac-8, de fácil acesso, com características distintas e obtendo-se uma mesma cavidade para aplicação em processo de injeção. Além de que, a matéria-prima zamac-8 tem um valor de aquisição menor que o aço 1045, diminuindo os custos da obtenção de uma ferramenta com este material.

Na usinagem destes materiais utilizaram-se ferramentas e parâmetros conhecidos nos processos de usinagem. O zamac-8 foi usinado utilizando-se parâmetros de corte do alumínio. Mesmo assim, obteve-se mais rapidamente uma ferramenta de injeção em zamac-8 do que em aço 1045.

Os moldados nestes moldes não apresentaram contaminação de elementos de liga do molde. Também a variação de T_m (e conseqüentemente da T_g) dos polímeros processados, moldados em molde de aço 1045, zamac-8 e somente processado foram não-significativas.

A utilização de ferramentas computacionais auxiliou na garantia da qualidade de projeto. Resultados oriundos de suas análises facilitaram a tomada de decisão, mesmo na impossibilidade de atendimento dos parâmetros fornecidos, como no exemplo da simulação de injeção e aplicação de seus parâmetros indicados para o processo de injeção. Um melhor controle de temperatura do molde poderia ser empregado para se testar os parâmetros indicados pelo sistema.

As ferramentas de injeção em zamac-8 e aço 1045 resistiram aos esforços do processo de injeção. Por possuir uma condutibilidade térmica maior que ao aço, pensava-se na possibilidade da ocorrência de contrações ou rechupes nos injetados em zamac-8, as quais não ocorreram. Mas, a diminuição dos ciclos de injeção, comparados ao aço 1045, não aconteceu. Acredita-se que fatores ambientais extremos influenciaram fortemente os resultados da análise do ciclo de injeção.

A razão da existência de um molde-protótipo é de se obter um produto injetado com as características de um injetado em molde convencional. Os ensaios mecânicos mostraram diferenças na comparação dos moldados em moldes de zamac-8 e aço 1045. Com as análises feitas, não se pôde afirmar se um rápido resfriamento do moldado em zamac-8, conferiu-lhe um caráter amorfo. Estas diferenças podem estar relacionadas ao arranjo cristalino do moldado.

A cristalinidade dos polímeros têm relações com as características mecânicas do moldado. Este foi um ponto a ser melhorado neste estudo. Para verificação do arranjo cristalino, teria sido recomendável uma análise de difração de raio-x, por exemplo. Como a estrutura cristalina consiste no agrupamento ordenado de átomos e moléculas, é possível definir a menor unidade que se repete ordenadamente. A técnica de difração de raio-x (DRX) é uma ferramenta de análise de estruturas dos materiais.

Se houve a formação de uma pele no moldado em zamac-8, é possível estimar o valor de sua nanodureza e módulo elástico e compará-lo ao aço 1045, bem como das suas diferentes fases, se houverem.

Aspectos de biossegurança e ambientais foram observados em projeto, garantindo sua higidez num ambiente sustentável. Do ponto de vista ambiental, a possibilidade de se reutilizar o molde reduz a extração de matéria-prima e demandando menos energia em sua reutilização, por seu baixo ponto de fusão. Seu internamento no processo produtivo aumenta ainda mais a vantagem econômica de aquisição desta matéria-prima. Estas características cumprem uma função ambiental e econômica.

Entretanto, uma avaliação porta-porta (como recebido e utilizado) deste estudo, não é suficiente para garantir uma qualidade ambiental. Será realmente ambientalmente correta, se for realizada uma avaliação do ciclo de vida nos dois moldes e comparando seus resultados.

5.2 Conclusões

Um dos critérios utilizados neste estudo foi relativo aos custos da obtenção de um molde usinado. Na obtenção da ferramenta em zamac-8, houve uma redução de 34% do tempo em comparação à obtenção de uma ferramenta em aço 1045. Na aquisição de matéria-prima para confecção dos moldes, com o material zamac-8 houve uma redução de 71% destes custos em relação ao material aço 1045.

No processo de injeção, os moldes-protótipo em zamac-8 e aço 1045, produziram moldados com características dimensionais conforme a norma aplicada e ambos os moldes não contaminaram seus moldados com elementos de liga.

Os moldados em moldes de zamac-8 e aço 1045 apresentaram características mecânicas distintas sendo as qualidades dimensionais e mecânicas do polipropileno moldado em molde de zamac-8 mais homogêneo comparado ao polipropileno moldado em aço 1045.

A análise ambiental de reciclagem do molde em zamac-8 ficou limitada ao próprio material de molde. Não foi possível a reciclagem e reutilização dos cavacos de zamac-8, provenientes da operação de usinagem.

Houve a redução da emissão de passivos ambientais e conseqüente contaminação ambiental pela eliminação do uso de meios lubi-refrigerantes na usinagem do zamac-8.

Este estudo mostrou a viabilidade de se utilizar o material zamac-8 usinável, comercial e de fácil acesso, sendo alternativo ao aço, visando a redução de custos da obtenção de um molde de baixa tiragem e incorporando aspectos ambientais.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como foi viável a utilização do zamac-8 para material de molde, espera-se para o futuro algumas constatações dele e servindo de base para outras análises.

Assim, por não terem sido previstos neste estudo, necessita-se de outros ensaios para melhorar o entendimento do comportamento do moldado e a continuação dos resultados obtidos aqui. Como sugestões, alguns indicativos de trabalhos futuros:

- Repetir os ciclos de injeção, com moldes em temperaturas mais elevadas e com as análises físico-mecânicas dos moldados obtidos desta forma. Incorporando-se nesta análise, os ensaios de difração de raio-x e nanodureza;
- Estudo do material zamac, buscando a melhor composição de elementos de liga para a fabricação de moldes de injeção e melhorar sua reciclagem;
- Estudo específico de usinagem sobre o zamac-8. Neste trabalho foram utilizados como parâmetros de usinagem os relativos ao alumínio. Um incremento nestes parâmetros poderá repercutir numa redução ainda maior do tempo de obtenção da ferramenta;
- Análise do Ciclo de Vida sobre os moldes em aço e zamac-8, buscando a qualidade ambiental desejada para ambos.

Referências

- ALCOA – **O Alumínio: História do alumínio, como é feito, reciclagem**; Disponível em <http://www.alcoa.com.br/o_aluminio/hist_aluminio.asp>. Acesso em 16 jul. 2011.
- ALPHA Galvano-química brasileira Ltda.; **Boletim Técnico de Zamac**; D.T.O.1. Curitiba, 2005.
- AMORIM, J., R.; **Sistemática para Fresamento e Montagem de Postiços em Insertos Poliméricos para Moldes-Protótipo**; Dissertação de Mestrado. PPGEM – UTFPR. Curitiba, 2006.
- ARNOLD, H.; **The Recent History of the Machine Tool Industry and the Effects of Technological Change**; Institute for Innovation Research and Technology Management. University of Munich, 2001.
- BARBOSA, C., A.; **Desempenho de Aços para Confecção de Moldes para Plásticos**; Workshop sobre tecnologia de fabricação de moldes. São Paulo, 2001.
- BARETA, D.R.; COSTA, C.A.; BAUMVOL, I.J.R.; POUZADA, A.S.; **Aplicação de Materiais Alternativos em Moldes Híbridos de Injeção**; Mídia do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, 2006.
- BARRY, C.; BOOTHROYD, P.; LAI, F.; NUMM, R., E.; ORROTH, S., A.; SCHOTT, N., R.; **Short Shot Method of Injection Molding**; Plastic Processing Laboratory Syllabus, Lowell-Plastic Engineering Department. 6 Ed. University of Massachusetts, 1995.
- BLASS, A.; **Processamento de Polímeros**; Série Didática, Editora da UFSC. Florianópolis, 1988.
- BRADY, G. S. ; CLAUSER, H. R.; VACCARI, J. A.; **The Materials Handbook**; McGraw- Hill. 15 ed. New York, 2002.
- BRALLA, J.G.; **Design for Manufacturability**; McGraw-Hill. 2 ed. New York, 1999.
- BRETAS, R. E. S.; D´ÁVILA, M. A.; **Reologia de Polímeros Fundidos**; Editora da UFSCar. São Carlos, 2000.

- CALLISTER, Jr., W.; **Materials Science and Engineering – an introduction**; John Wiley & Sons. New York, 1994.
- CANEVAROLO Jr., S., V.; **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**; Artliber Editora. São Paulo, 2002.
- CARDON, L.; MARTÍNEZ, L.; VANHEE, P.; **The Effect of the Cooling Phase on the Degree of Crystallisation of Polypropilene**; Rapid Product Development. 2006.
- CHIAVERINI, V.; **Tecnologia Mecânica - Processos de fabricação e tratamento**; Vol. III. McgrawHill. São Paulo, 1986.
- _____.; **Tecnologia Mecânica – Materiais de construção mecânica**; Vol. III. McgrawHill. São Paulo, 1986.
- CHU, W., K.; MAYER, J., W.; NICOLET, M., A.; **Backscattering Spectrometry**; Academic Press. New York, 1978.
- CHUA, C. K.; HONG, K. H.; HO, S. L.; **Rapid Tooling Technology - Part 1 - A comparative stud**; The International Journal of Advanced Manufacturing. London, 1999.
- CHUA, C., K.; TEH, S., H.; GAY, R., K., L.; **Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing**; The International Journal of Advanced Manufacturing. Volume 15. London, 1999. pp.597-603
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C.A.; **Administração de Produção e Operações – Manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**; Editora Atlas. São Paulo, 2005.
- COWIE, J. M. G.; **Polymers: Chemistry and Physic of Modern Materials**, Ed. Chapman and Hall, New York, 1991.
- CRUZ, S.; **Moldes de Injeção – Termoplásticos, termofixos, zamac, sopro e alumínio**; 2 Ed. Editora Hemus. São Paulo, 2002.
- DAWSON, A.; RIDES, M.; ALLEN, C.R.G.; URQUHART, J.M; **Polymer–mould interface heat transfer coefficient measurements for polymer processing**; Elsevier Science Publications Company. Amsterdam, 2008. pp. 555-565

- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G.; **Microscopia Eletrônica de Varredura – Aplicação e preparação de amostras**; EDIPUCRS. Porto Alegre, 2007.
- FERREIRA, C.V., PAES, A., ANDRADE G. - **Modelagem e sistematização do processo de desenvolvimento de produtos de plástico injetado no SENAI CIMATEC**; Mídia do Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos, Gramado - RS. Artigo.2003.
- FILOMENA, T., P.; **Modelo para Medição e Controle de Custos no Desenvolvimento de Produto**; Trabalho de Mestrado. PPGEP - UFRGS. Porto Alegre, 2004.
- FOGGIATTO, J., A.; SALMORIA, G., V.; AHRENS C., H.; PIRES, A., T., N. - **Moldes de ABS Construídos pelo Processo de Modelagem por Fusão e Deposição para Injeção de PP e PEBD**; Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 14, n° 5, 2004. pp. 349-353.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C.A. dos - **Ensaio dos Materiais**; Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2000.
- GERDAU; **Catálogo de Produtos**; Brasil 2011; Disponível em www.comercialgerdau.com.br; acessado em 30 de setembro de 2011.
- GLANVILL, A., B.; DENTON, E., N.; **Moldes de Injeção – Princípios básicos e projetos**; Editora. Blücher. São Paulo, 1994.
- GODEC, D.; SERCER, M.; SOKELE, M., R. - **Influence of Hybrid Mould on Moulded Parts Properties**; Rapid Prototyping Journal. 14/2. 2008. pp. 95-101.
- GRIMM, T.; **User's Guide to Rapid Prototyping**; SME. Michigan, 2004.
- GROOVER, M. P.; **Fundamentals of Modern Manufacturing – Materials, process and systems** - John Wiley & Sons. New Jersey, 2002.
- GUENZA, J., E.; **Análise do Desempenho do Fresamento em Altas Velocidades de Corte do Ferro Fundido GG25 em Aplicação Industrial**; Dissertação de Mestrado. PPGEM – UTFPR, 2008.
- HARADA, J; **Moldes para injeção de termoplásticos – Projetos e princípios básicos**; Artliber. São Paulo, 2004.

_____.; **A Importância dos Projetos de Moldes para Injeção de Termoplásticos**; Revista Ferramental. Joinville, Maio/Junho 2006.

HILTON, P.D.; JACOBS, P.F.; **Rapid Tooling and Industrial Applications**; Marcel Dekkers Inc. New York, 2000.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P.; **A Comparison Between Stereolithography and Aluminium Injection Moulding Tooling**; Rapid Prototyping Journal. Volume 6 n°4. 2000. pp. 245-258.

ILYAS, I.; TAYLOR, C.; DALGARNO, K.; GOSDEN, J.; **Design and Manufacture of Injection Mould Tool Inserts Produced Using Indirect SLS and Machining Processes**; Rapid Prototyping Journal 16/6. 2010. pp. 429–440

INNOVA; **Manual de Injeção**; Artigo técnico. Grupo Petrobrás, 2010. Disponível em www.petrobras.com.br; acessado em julho de 2010.

ISHIZAKI, M., H.; VISCONDE, L.,L.,Y.; FURTADO, C.,R.,G.; LEITE, M.,C.,A., M.; LEBLANC, J.,L.; **Caracterização Mecânica e Morfológica de Compósitos de Polipropileno e Fibras de Coco Verde: Influência do Teor de Fibra e das Condições de Mistura**; Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol.16, n°3. São Carlos, 2006.

JACOBS, P. F.; **Stereolithography and others RP & M technologies – From rapid prototyping to rapid tooling**; ASME Press. New York, 1996.

KASZYNSKI, J.; **Tooling Materials for Plastic Molding Applications**; McGraw-Hill. New York, 2004.

LAYARGUES, P.; **O Cinismo da Reciclagem - O significado ideológico da reciclagem da lata de alumínio e suas implicações para a educação ambiental**; Cortez. São Paulo, 2002. pp.179-220.

LENCINA, D.; **Produção de Moldes Ganha Tempo com Prototipagem**; 3° Fórum Técnico do Plástico, Sapucaia, RS. in Revista Plástico Moderno Ed. 346. São Paulo, 2003.

MAIA, D., R., J.; DePAOLI, M., A.; **Embranquecimento do Polipropileno Isotático Injetado Contendo TiO₂ como Pigmento**; Polímeros – Ciência e Tecnologia, vol.10, n 4. 2000. pp. 209 – 217.

- MANO, E. B.; **Introdução a Polímeros**; Ed. Edgard Blücher. São Paulo, 1985.
- MARTINHO, P., G.; BÁRTOLO, P., J.; POUZADA, A., S.; **Hybrid Moulds: effect of the moulding blocks on the morphology and dimensional properties**; Rapid Prototyping Journal, 15/1. 2004. pp. 71-82.
- MALLOY, R. A.; **Plastic Part Design for Injection Molding – An introduction**; Hanser Gardner Publications. New York, 1994.
- MAZAK LIMITED; **Catálogo de Fabricante**; United Kingdon. 2008. Disponível em: <<http://www.mazak-limited.co.uk/>> Acesso em: junho 2008.
- MENGES, G.; MICHAEL, W.; MOREHN, P.; **How to Make Injection Molds**; Hanser Gardner Publications. 3 Ed. New York, 1999.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE; **Atenção a Saúde dos Trabalhadores Expostos ao Chumbo Metálico**; Protocolos de Complexidade Diferenciada. Brasília, 2006.
- MURAYAMA, T.; **Dynamic Mechanical Analysis of Polymeric Polymers**; Elsevier Science Publications Company. Amsterdam, 1978.
- NAGAHANUMAIAH.; SUBBURAJ, K.; RAVI, B.; **Computer Aided Rapid Tooling Process Selection and Manufacturability Evaluation for Injection Mold Development**; Science Direct – Computers in Industry 59. Elsevier, 2008. pp. 262-276.
- OLIVEIRA, J. M.; **Caracterização de superfícies usinadas para superfícies de moldes e matrizes**; Dissertação de mestrado; Universidade de Caxias do Sul. 2006.
- OXIDO METAL S.A.; **Catálogo de Produtos**; Argentina. 2008. Disponível em: <http://www.grupointustrial.com.ar/oxido/index_oxido_p.html> Acesso em: junho 2008.
- PADILHA, A.F.; **Materiais de Engenharia - Micro-estrutura e propriedades**; Editora Hemus. Curitiba, 2000.
- PAHL, G.; BEITZ, W; FELDHUNSEN, J.; GROTE, K., H.; **Engineering Design - A systematic approach**; Springer-Verlag. 3° Ed. London, 2007.
- PÉREZ, C. A. C.; **Estudos Cristalográficos de Polipropileno por Difração de Raio-X**; Dissertação de Mestrado; Centro de Pesquisas Físicas (CBPF), 1993.

PETROPOL POLÍMEROS; **Catálogo de Produtos**; Brasil. 2010. Disponível em: <http://www.petropol.com.br/pt_br/technical.htm> Acesso em: junho 2010.

PINHEIRO, F., L.; **Proposta Metodológica para Determinação da Técnica a ser Utilizada na Fabricação de Ferramental Rápido – Um estudo de caso na concepção do molde protótipo para injeção plástica**; Dissertação de Mestrado; PPGEPS - PUCPR, 2008.

PINTO, A., L.; **Relação entre Microestrutura e Propriedades Mecânicas no Polipropileno de Ultra Alto Peso Molecular**; Dissertação de Mestrado; Instituto militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1998.

PLEPIS, A.M.G.; **Caracterização Térmica e Viscoelástica de Resinas Poliuretanas derivadas de Óleo de Mamona**; Universidade de São Paulo. São Carlos, 1991.

PRADO, M., R.; **Análise do Inventário do Ciclo de Vida de Embalagens de Vidro, Alumínio e PET Utilizadas em uma Indústria de Refrigerantes no Brasil**; Tese de Doutorado; PPGTA – UFPR, 2007.

QUEIRÓS, L., M., P. de; **Projeto de Moldes Híbridos com Auxílio de Técnicas Assistidas por Computador**; Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, 2005.

RADSTOK, E.; **Rapid Tooling**; Rapid Prototyping Journal. United Kingdom, 1999. Vol. 5, n.º. 4, pp. 164-168.

RICK, C. F.: **Estudo da Liga à Base de Zn-Al-Cu-Mg Aplicada na Fabricação de Jóias Folhadas**. Dissertação de mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. PUC-RS. Porto Alegre, julho de 2006.

ROSATO, D.; ROSATO, D.; ROSATO, M.; **Injection Molding Handbook**; Kluwer Academic Publishers. 3 Ed. Massachusetts, 2000.

ROZENFELD, H; FORCELLINI, F.A.; **Gestão de Desenvolvimento de Produtos – Uma referência para a melhoria do processo**; Saraiva. São Paulo, 2006.

SACCHELLI, C., M.; **Abordagem Comparativa entre as Tecnologias de Processo CIME e a Tecnologia Convencional de uma Empresa Fabricante de Moldes para Injeção Plástica**; Tese de Doutorado. UFSC, 2007.

SALMORIA, G., V.; AHRENS, C., H.; VILLAMIZAR, F., A., Y.; NETTO, A., C., S; **Influência do Desempenho Térmico de Moldes Fabricados com Compósito Epóxi/Alumínio nas Propriedades de PP Moldado por Injeção**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº 3, p. 262-269, 2008.

SANDVIK; **Pesquisa Acelera e dá Tom de Modernidade à Usinagem**. O mundo da usinagem, vol 2. Publicação da Divisão Coromant da Sandvik do Brasil. São Paulo, 2000.

SANT'ANNA, J.P.; **Ferramentas Devem Orientar Compras em Aspectos Técnicos**; Revista Plástico Moderno. Edição 413. São Paulo, março de 2009.

STEMMER, C., E.; **Ferramentas de Corte I**; 3º Ed. Editora UFSC. Florianópolis, 1993.

VASCONCELOS, P. V., LINO, F. J., MAGALHÃES, A., NETO, R. J. L. **Impact Fracture Study of Epoxy-based Composites With Aluminium Particles and Milled Fibres**; Journal of Materials Processing Technology. Vol. 170. 2005. pp. 277-283.

VOLPATO, N.; AHRENS, C., H.; FERREIRA, C., V.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J.; SANTOS, J., R., L. dos; SILVA, J., V., L., da; **Prototipagem Rápida – Tecnologias e aplicações**; Editora Blücher. São Paulo, 2007.

VOLPATO, N., DERINIEVICKI, O; **Uma Análise da Usinagem de Resinas para Ferramental Rápido**; In media: Anais do 3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação COBEF 2005. Joinville, 2005.

WEINGAERTNER, W.L.; SCHROETER, R.B.; **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas – Tornear, Fresar, Furar, Serrar**; Alcan Alumínios do Brasil. 2 ed. São Paulo, 1991.

WENDHAUSEN, P., A., P.; **Análises Térmicas**; Curso de Engenharia de Materiais. UFSC, 2010.

WOHLERS, T.; **Rapid Prototyping and Tooling**; Worldwide Progress Report; Colorado, 1998.

WRUBLAK, O., PILATTI, L., A., PEDROSO, B.; **Parâmetros e Métodos de Usinagem e Sua Relações com os Custos de Acabamento e Produto Final**; 4º

Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, Ponta Grossa, Brasil. 2009.

WUNDERLICH, B; **Thermal Characterization of Polymer Materials**; Academic Press Inc. 2.ed. New York, 1997. vol. 1, pp. 305.

XU, F.; LOH, H.T.; WONG, Y.S.; **Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems**; Rapid Prototyping Journal; Vol. -5 N°2; pp. 54-60; 1999.

ZHOU, J. G.; HE, Z.; **A New Tooling Technique and Special Binder Study**; Rapid Prototyping Journal; Vol. -5 N°2; pp. 82-88; 1999.