

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

VANDERLEI JUNKES

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO PP INJETADO EM MOLDE-
PROTÓTIPO EM ZAMAC-8 VISANDO A OBTENÇÃO DE
PROTÓTIPOS FUNCIONAIS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
NOVEMBRO 2014

VANDERLEI JUNKES

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO PP INJETADO EM MOLDE-
PROTÓTIPO EM ZAMAC-8 VISANDO A OBTENÇÃO DE
PROTÓTIPOS FUNCIONAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para 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, Ph.D.

CURITIBA
NOVEMBRO – 2014

TERMO DE APROVAÇÃO

VANDERLEI JUNKES

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO PP INJETADO EM MOLDE- PROTÓTIPO EM ZAMAC-8 VISANDO A OBTENÇÃO DE PROTÓTIPOS FUNCIONAIS

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. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador de Curso

Banca Examinadora

Prof. Gean Vitor Salmoria, Dr.
UFSC

Prof^a. Elaine Cristina de Azevedo, Dra.
UTFPR

Prof. Neri Volpato, Ph.D.
UTFPR

Curitiba, 20 de novembro de 2014

Aos meus pais Irineu e Elvira pelo incentivo nos momentos difíceis.

A minha esposa Adelaide pela paciência e compreensão.

Aos meus filhos Gabriel e Janaina por entenderem que as grandes conquistas demandam tempo e grande esforço.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Neri Volpato, Ph.D. pela orientação e seriedade com que me conduziu durante este trabalho.

À Profa. Dra. Elaine Cristina de Azevedo, Departamento de Física da UTFPR de Curitiba, pelo auxílio e contatos feitos para que os ensaios pudessem ser realizados.

À Profa. Dra. Edcleide Maria Araújo da Universidade de Campina Grande, Departamento de Engenharia dos Materiais e a pesquisadora Amanda Melissa Damião Leite pela realização do ensaio de impacto.

Ao Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt da UTFPR – Unidade Medianeira, Departamento de Química, e a pesquisadora Juliana Cortez pela realização do ensaio de DSC.

Ao Prof. Me. Roberto Luís Assumpção da UTFPR – Unidade de Curitiba pela ajuda na realização do ensaio de tração.

À estagiária Daphene Solis, graduanda de Engenharia Mecânica da UTFPR, pela ajuda nos ensaios de injeção e demais atividades.

A todos do NUFER principalmente ao Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto, pelas sugestões apresentadas.

Finalmente à UTFPR e a todos que contribuíram para a realização deste estudo.

RESUMO

JUNKES, Vanderlei. Análise das propriedades do PP injetado em molde-protótipo em zamac-8 visando a obtenção de protótipos funcionais. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

O uso de moldes-protótipo é uma opção para a obtenção de protótipos funcionais de peças de plástico injetadas. Estes protótipos devem possuir características mecânicas e físicas as mais próximas possíveis das peças finais obtidas em moldes de produção. A fim de diminuir o custo e o tempo de fabricação destes moldes, materiais alternativos, tais como o alumínio e ligas de zinco, podem ser empregados. Os diferentes níveis de condutividade térmica desses materiais resultam em diferentes taxas de resfriamento do polímero, o que pode influenciar nas propriedades mecânicas do moldado. O objetivo geral deste trabalho é entender a influência do material do molde-protótipo (zamac-8) e também da variação da temperatura do molde (T_{Molde}) e da temperatura do fundido (T_{Fund}) nas propriedades mecânicas do moldado em Polipropileno (PP). Pretende-se então averiguar se existem parâmetros de temperatura que possam permitir a obtenção de protótipos funcionais com características próximas as de peças injetadas em molde de aço. O efeito do material zamac-8, da T_{Molde} e da T_{Fund} sobre as propriedades do moldado foi avaliado através da comparação com um moldado injetado em um molde em aço. As técnicas de caracterização das amostras incluíram os ensaios de tração, impacto e calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os resultados mostraram que o molde-protótipo em zamac-8 possui influência significativa somente para a energia de impacto. Com a variação da T_{Molde} e da T_{Fund} foram obtidos moldados com diferentes propriedades no molde-protótipo em zamac-8, confirmando a influência da variação destes fatores sobre o moldado. Desta forma, foi possível criar um modelo de regressão onde através da otimização dessas temperaturas é possível prever um resultado. Assim, para este estudo, foi possível diminuir a influência do uso do zamac-8 sobre o moldado, sendo que a regressão mostrou-se uma ferramenta importante na busca de protótipos funcionais com propriedades mecânicas mais próximas do produto final.

Palavras-chave: Molde-protótipo. Protótipo funcional. Molde de injeção. Propriedades mecânicas. Polipropileno copolímero.

ABSTRACT

JUNKES, Vanderlei. Properties analysis of the PP injected in zamac-8 prototype tooling aiming functional prototypes. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

The use of prototype tooling is an option to obtain functional prototype of injection molded plastic parts. These prototypes should have mechanical and physical characteristics as close as possible to the final parts obtained in production molds. In order to reduce manufacturing cost and time of these molds, alternative materials, such as aluminum and zinc alloys, can be employed. The difference in thermal conductivity of these materials results in a variation of the cooling rates, which can influence the mechanical properties of the moldings. The main objective of this work is to understand the influence of the prototype tooling material (zamac-8) and also the variation of mold temperature (T_{Mold}) and the melt temperature (T_{Melt}) on the mechanical properties of Polypropylene (PP). The idea is then to verify if these temperature parameters may allow obtaining functional prototypes with similar characteristics to the PP injected in a steel mold. The influence of the zamak-8 material and the T_{Mold} and T_{Melt} on the properties of the molding was studied by comparison with the molding injected in a steel mold. The characterization techniques used were tensile and impact tests and differential scanning calorimetry (DSC). The results showed that the prototype tooling using zamak-8 has a significant influence only in the impact energy. By varying the T_{Mold} and T_{Melt} , moldings injected in the prototype tooling with zamak-8 were obtained with different properties, confirming the influence of these parameters on the molding. In this way, a regression model was developed where, by optimizing these temperatures, it is possible to predict a result. Thus, in this study it was possible to reduce the influence of the zamak-8 on the molded, and regression was shown to be an important tool in the search for functional prototypes closer mechanical properties of the final product.

Keywords: Prototype tooling. Functional prototype. Injection molding. Mechanical properties. Polypropylene copolymer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo miscela franjada	18
Figura 2.2 - Modelo da cadeia dobrada.....	19
Figura 2.3 - Representação da estrutura detalhada de um esferulito.....	20
Figura 2.4 - Micrografia óptica da estrutura de um esferulito de polietileno	20
Figura 2.5 – Modelo de estrutura <i>Shish-Kebab</i>	21
Figura 2.6 – Deformação em um polímero semicristalino.	22
Figura 2.7 – Representação molecular do PP homopolímero.....	25
Figura 2.8 – Representação molecular do PP copolímero randômico.	26
Figura 2.9 – Representação molecular do PP copolímero heterofásico.....	26
Figura 2.10 - Definição de zonas de microscopia óptica do iPP	29
Figura 2.11 – Orientação para o PP homopolímero injetado	30
Figura 2.12 – Orientação para o PP copolímero heterofásico injetado	31
Figura 2.13 - Representação do fluxo durante o processo de injeção	31
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas para o estudo	42
Figura 3.2 – Dimensionamento do corpo de prova segundo ASTM D-638	44
Figura 3.3 – Dimensionamento do corpo de prova segundo ASTM D-256	44
Figura 3.4 – Montagem do porta-molde e insertos intercambiáveis.....	46
Figura 3.5 – Direção do fluxo conforme posicionamento da chave direcionadora. ...	46
Figura 3.6 – Equipamento de banho termostático.....	47
Figura 3.7 – Circuito de circulação de água na cavidade moldante.	48
Figura 3.8 – Dimensionamento da localização dos canais de injeção.	48
Figura 3.9 – Localização do alojamento do termopar.....	49
Figura 3.10 – Codificação das amostras.....	50
Figura 3.11 – Aparelho Ceast resil 5.5 utilizado para ensaio de impacto Izod.	53
Figura 3.12 – DSC marca PerkinElmer modelo STA 6000.....	54
Figura 3.13 – Região onde foi determinada a cristalinidade por DSC.....	55
Figura 4.1 – Problemas de vazios e rebarbas nas amostras injetadas em PP.....	57
Figura 4.2 – Corpo de prova obtido após alteração do curso de fechamento.	58
Figura 4.3 – Gráfico comparativo da cristalinidade	59
Figura 4.4 – Gráfico comparativo das entalpias.	60
Figura 4.5 – Gráfico de efeitos das temperaturas sobre a cristalinidade.....	62
Figura 4.6 – Gráfico comparativo das propriedades de tração.....	65
Figura 4.7 – Gráfico comparativo tensão – deformação.....	66
Figura 4.8 – Interação entre as temperaturas para a tensão máxima.	68

Figura 4.9 – Gráfico de efeitos para as propriedades de tração.....	69
Figura 4.10 – Teste de Tukey simultâneo	73
Figura 4.11 – Gráfico de otimização para Tensão Máxima.	73
Figura 4.12 – Gráfico de otimização para Módulo de Elasticidade.....	74
Figura 4.13 – Gráfico comparativo para a energia de impacto.....	75
Figura 4.14 – Interação entre as temperaturas para a energia de impacto.....	77
Figura 4.15 – Gráfico de efeito das temperaturas para a energia de impacto.....	77
Figura 4.16 – Gráfico de otimização para energia de impacto.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Variáveis de controle.....	24
Tabela 2.2 – Resultados da variação da temperatura do molde.....	36
Tabela 3.1 – Propriedades Mecânicas do PP CP-204.....	43
Tabela 3.2 – Propriedades do material zamac-8.....	45
Tabela 3.3 - Propriedades do aço SAE 1045.....	45
Tabela 3.4 – Parâmetros de temperaturas utilizados pelas empresas.....	51
Tabela 3.5 – Parâmetros para os corpos de prova moldados no molde em aço.....	51
Tabela 3.6 - Parâmetros para os corpos de prova obtidos no molde-protótipo em zamac-8.....	52
Tabela 4.1 – Resultado do percentual de cristalinidade ($\chi_c\%$).....	59
Tabela 4.2 – ANOVA para cristalinidade dos corpos de prova.....	61
Tabela 4.3 – ANOVA para cristalinidade em função das temperaturas.....	61
Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de tração do corpo de prova em PP.....	64
Tabela 4.5 – ANOVA para as propriedades de tração dos corpos de prova.....	66
Tabela 4.6 – ANOVA para as propriedades de tração em função das temperaturas.....	67
Tabela 4.7 – ANOVA para regressão linear para as propriedades de tração.....	71
Tabela 4.8 – Teste de Tukey comparação pareada das médias.....	72
Tabela 4.9 – Resultado do ensaio de impacto para o corpo de prova em PP.....	74
Tabela 4.10 - ANOVA para energia de impacto dos corpos de prova.....	75
Tabela 4.11 - ANOVA para energia de impacto em função das temperaturas.....	76
Tabela 4.12 - ANOVA para regressão linear em função da energia de impacto.....	79
Tabela 4.13 - ANOVA para regressão quadrática para a energia de impacto.....	79
Tabela 4.14 – Predição dos resultados com a variação da T_{Molde} e da T_{Fund}	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	- Acrilonitrila, Butadieno e Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
AM	- Manufatura Aditiva (<i>Additive Manufacturing</i>)
ANOVA	- Análise da Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
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>)
CAM	- Manufatura Auxiliada por Computador
DF	- Direção do Fluxo
DN	- Direção Normal ao Plano
DT	- Direção Transversal
DSC	- Calorimetria Exploratória Diferencial (<i>Differential scanning calorimetry</i>)
EPR	- Borracha de Etileno-Propileno (<i>Ethylene Propylene Rubber</i>)
CNC	- Comando Numérico Computadorizado
iPP	- Polipropileno Isotático
NUFER	- Núcleo de Prototipagem e Ferramental
PP	- Polipropileno
RP	- Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
RT	- Ferramental Rápido (<i>Rapid Tooling</i>)
T _c	- Temperatura de Cristalização
T _{Fund}	- Temperatura do Polímero Fundido
T _{Molde}	- Temperatura do Molde
UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná
χ _c %	- Percentual de Cristalinidade
WAXD	- Difração de Raios X em Alto Ângulo (<i>Wide Angle X-ray Diffraction</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE PESQUISA.....	14
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 JUSTIFICATIVA	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2 PROTÓTIPOS FUNCIONAIS INJETADOS	17
2.1 MORFOLOGIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS POLÍMEROS	17
2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO	23
2.3 POLIPROPILENO	24
2.4 MORFOLOGIA DO PP INJETADO	27
2.5 MOLDES-PROTÓTIPO	32
2.6 PROTÓTIPOS FUNCIONAIS.....	33
2.7 INFLUÊNCIA DO MATERIAL DO MOLDE-PROTÓTIPO NO MOLDADO	34
2.8 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO NA ESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MOLDADO	35
2.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 MATERIAL PARA O MOLDADO	43
3.2 GEOMETRIA DOS CORPOS DE PROVA	43
3.3 MATERIAL PARA O MOLDE-PROTÓTIPO	44
3.4 MATERIAL PARA O MOLDE REPRESENTATIVO DA PRODUÇÃO FINAL	45
3.5 MOLDE DE INJEÇÃO EXPERIMENTAL.....	45
3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA A MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....	49
3.6.1 Obtenção do Moldado Representativo da Produção Final	50
3.6.2 Obtenção das Amostras no Molde em Zamac-8	51
3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS AMOSTRAS	52
3.7.1 Ensaio de Tração	52
3.7.2 Impacto Izod.....	53
3.8 DETERMINAÇÃO DA CRISTALINIDADE	54
3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1 INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	57
4.2 RESULTADOS DA CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC) ..	58

4.2.1 Influência do Material do Molde sobre a Cristalinidade do Moldado	59
4.2.2 Efeito da Temperatura do Molde e do Fundido sobre a Cristalinidade do Moldado Obtido em Zamac-8.....	61
4.2.3 Regressão para a Cristalinidade	63
4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	63
4.3.1 Influência do Material do Molde em Zamac-8 nas Propriedades de Tração.....	64
4.3.2 Efeito da Temperatura do Molde e do Fundido nas Propriedades de Tração do Moldado Obtido em Zamac-8.....	67
4.3.3 Regressão para as Propriedades de Tração.....	70
4.4 RESULTADO E COMPARAÇÃO DO ENSAIO DE IMPACTO	74
4.4.1 Influência do Material do Molde em Zamac-8 sobre as Propriedades de Impacto	75
4.4.2 Efeito da Temperatura do Molde e do Fundido nas Propriedades de Impacto do Moldado Obtido em Zamac-8.....	76
4.4.3 Regressão para a Energia de Impacto.....	78
4.5 OTIMIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS VISANDO A OBTENÇÃO DE PROTÓTIPOS FUNCIONAIS NO MOLDE EM ZAMAC-8.....	80
5 CONCLUSÃO	81
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.2 CONCLUSÃO.....	81
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A	91

1 INTRODUÇÃO

A utilização de componentes de plástico injetados tem crescido rapidamente nos últimos anos, fazendo surgir à necessidade da redução do tempo de obtenção destes componentes (MARTINHO, 2010). Como parte deste desenvolvimento, é usual o emprego de modelos físicos (protótipos), que auxiliam principalmente em testes reais de uso, conhecidos como protótipos funcionais (VANDRESEN, 2003). Uma maneira para a obtenção de protótipos funcionais injetados é fazer o uso de um molde-protótipo. O uso deste tipo de molde permite que as peças nele obtidas, possam ser injetadas em condições muito próximas a de um molde de produção, assegurando que este moldado apresente características mecânicas, físicas e morfológicas típicas do processo de injeção (VOLPATO e AMORIM, 2005).

Segundo Volpato e Amorim (2005), materiais alternativos e diferentes técnicas de fabricação podem ser utilizados na obtenção do molde-protótipo, que deve ser de baixo custo e rápida execução. O menor tempo de fabricação e a capacidade de usinar praticamente qualquer tipo de material fazem com que a usinagem seja muito utilizada na obtenção de moldes-protótipo (SIEGEL, VOLPATO E GAEBLER, 2008). Com o intuito de reduzir tempo e custos, materiais de fácil usinabilidade são empregados. Resinas termofixas e ligas metálicas, como as de alumínio, de cobre e de zinco, estão entres as mais utilizadas (VOLPATO, GRZYNSKI e NETO, 2011).

Moldes-protótipo de ligas de zinco podem ser utilizados tanto para obtenção de protótipos funcionais, como lotes de baixa-tiragem por possuírem uma boa resistência (GRZYNSKI, 2011). No Brasil, estas ligas são comercializadas com o nome de zamac. Além de poder ser reciclada, e ter uma ótima usinabilidade, a liga de zinco é a que possui o menor custo de aquisição em relação aos demais materiais (GRZYNSKI, 2011). Entretanto, estes materiais alternativos apresentam resistência mecânica e condutividade térmica diferente às dos moldes convencionais em aço. A resistência influi na durabilidade do molde, enquanto a condutividade térmica acarreta em diferentes taxas de resfriamento e, conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas do moldado (CAVALHEIRO, 2007 e OZCELIK, OZBAY e DEMIRBAS, 2010).

Os parâmetros de injeção, assim como o material do molde, também têm grande influência nas propriedades mecânicas do moldado (NAGAOKAA *et al.*, 2005; CERMÁK *et al.*, 2005; OZCELIK, OZBAY e DEMIRBAS, 2010 e VIANA, 2004). Desta maneira, Godec, Sercer e Sokele (2008), buscaram através da variação dos parâmetros de pressão e tempo de recalque, T_{Fund} e velocidade de injeção aproximar as propriedades de massa, o dimensional e a resistência ao impacto sob tração entre moldados em PP obtidos em diferentes materiais de molde. Os moldados foram obtidos através da injeção em um molde em aço sinterizado com posterior infiltração em bronze e em um molde em aço 40CrMnMoS8 6 obtido através de usinagem. Como resultado os autores citam que através da variação dos parâmetros de injeção foi possível aproximar as propriedades analisadas.

Como observado no estudo Godec, Sercer e Sokele (2008) a influência do material do molde sobre o moldado pode ser minimizado através da variação de parâmetros de injeção. Porém, não foram encontrados trabalhos neste sentido analisando o par zamac como material para molde e o PP copolímero como material do moldado.

1.1 IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE PESQUISA

Ao utilizar materiais alternativos ao aço, na fabricação do molde-protótipo, as propriedades mecânicas do protótipo funcional podem ser afetadas. Como os parâmetros de injeção têm influência sobre o moldado, espera-se que através da sua variação, seja possível diminuir estas eventuais diferenças nas propriedades mecânicas. Como observado no estudo Godec, Sercer e Sokele (2008) a influência do material do molde sobre o moldado pode ser minimizado através da variação de parâmetros de injeção. No entanto, este tipo de análise ainda não foi realizada para um molde fabricado em zamac-8, e um moldado em PP copolímero heterofásico utilizando a variação da temperatura do molde (T_{Molde}) e da temperatura do fundido (T_{Fund}).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é entender a influência do material do molde-protótipo (zamac-8) e da variação da temperatura do molde e do fundido nas propriedades do moldado em PP copolímero heterofásico CP204 da fabricante Braskem S.A., visando identificar os parâmetros de temperatura que possam permitir a obtenção de protótipos funcionais com propriedades mecânicas próximas as de peças injetadas em molde de aço.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Criar um sistema de circulação de água no molde para resfriamento e aquecimento do mesmo visando controlar a temperatura do molde.
- Conhecer qual a faixa de T_{Molde} e de T_{Fund} é utilizado na injeção do PP copolímero pelas empresas de produção com o objetivo de obter moldados com propriedades mecânicas próximas as obtidas em um processo de produção.
- Avaliar a influência do molde-protótipo em material zamac-8 sobre a cristalinidade e as propriedades mecânicas de tração e impacto do moldado e analisar se existe relação entre a variação da cristalinidade e as propriedades mecânicas analisadas.
- Avaliar a influência da variação da T_{Molde} e da T_{Fund} sobre as propriedades analisadas e através de um método estatístico de regressão definir quais parâmetros de temperaturas utilizar no molde-protótipo em zamac-8, para gerar moldados com propriedades mecânicas próximas aos moldados obtidos no molde de aço.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nas fases iniciais do desenvolvimento de alguns produtos de plásticos injetados, os engenheiros precisam realizar testes funcionais em campo. Assim, para validação do projeto, é preciso garantir que o protótipo funcional que está sendo testado possua as mesmas propriedades que o produto que entrará posteriormente em produção. Desta maneira, ao utilizar um material alternativo na fabricação do molde-protótipo torna-se importante investigar qual a influência deste material sobre as propriedades mecânicas dos protótipos funcionais neles injetado e principalmente buscar soluções para que esta influência seja minimizada.

Este tipo de conhecimento é importante para empresas fabricantes de moldes (ferramentarias) e fornecedores de protótipos injetados, sendo que estes poderão fornecer aos engenheiros de produtos, moldados com características muito próximas ao produto final, aumentando a confiabilidade dos resultados dos testes funcionais.

As vantagens que o zamac-8 pode oferecer, como menor custo e tempo de fabricação e a crescente utilização do PP copolímero heterofásico, reforçam a necessidade de maiores estudos nesta área.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta uma introdução e apresentação do problema, os objetivos e as razões que justificam este estudo.

O Capítulo 2 envolve principalmente conceitos sobre a morfologia e propriedades mecânicas do polipropileno injetado; a influência dos parâmetros de injeção e do material do molde sobre o moldado entre outros conceitos básicos.

No Capítulo 3 são demonstrados os materiais e métodos que foram utilizados neste estudo. O capítulo demonstra também o planejamento experimental e como se deu a caracterização das propriedades mecânicas e de cristalinidade.

Os resultados dos ensaios, análises e discussões dos mesmos são apresentados no Capítulo 4. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e conclusões referentes a este estudo.

2 PROTÓTIPOS FUNCIONAIS INJETADOS

Neste capítulo são apresentados temas específicos e considerados importantes para entendimento deste estudo. Inicialmente é explanado conceitos sobre a morfologia e as propriedades mecânicas dos polímeros de um modo geral. Posteriormente a revisão trata da moldagem por injeção e do material utilizado neste trabalho; o polipropileno e sua morfologia quando injetado. Após, são descritos outros tópicos como moldes-protótipo e protótipos funcionais. Por último é feita uma revisão sobre a influência do material do molde-protótipo e dos parâmetros de injeção sobre o moldado.

2.1 MORFOLOGIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS POLÍMEROS

Segundo Banik (2006), a forma molecular e a maneira como as moléculas são dispostas em um material desempenham um papel importante para determinar suas propriedades. Ainda segundo o autor, a fase amorfa é caracterizada por uma disposição desorganizada das moléculas, enquanto na forma cristalina as estruturas apresentam uma ordenação tridimensional. Conforme Canevarolo (2006), os polímeros podem se apresentar na forma amorfa e cristalina, sendo que na maioria dos casos as duas estruturas são encontradas.

Segundo Mano e Mendes (2004), a cristalização é a transformação que ocorre no polímero fundido, quando o mesmo é resfriado abaixo de sua temperatura de fusão, de forma que a ordem cristalina começa a se estabelecer. Este processo de cristalização controla a estrutura macroscópica do polímero, determinando assim as propriedades finais do produto (AZEREDO, 2010). Os polímeros sintéticos são formados pelo emaranhamento das cadeias poliméricas, o que os diferem dos cristais de moléculas simples. Para estes polímeros o mecanismo e as condições envolvidas durante a cristalização definem características como dimensão e estrutura dos cristais, grau de cristalinidade e por consequência a morfologia do polímero. Desta forma, propriedades importantes como: física, térmica e mecânica, que influenciam na aplicação industrial do polímero é dependente desta cristalização (CAVALHEIRO, 2007).

Segundo Callister (2007), o estado cristalino em materiais poliméricos envolvem moléculas em vez de apenas átomos ou íons, como acontece com os metais e cerâmicas. Assim, o arranjo atômico é mais complexo para os polímeros. Como consequência do seu tamanho e complexidade, muitas vezes, as moléculas de polímero são apenas parcialmente cristalinas, tendo regiões cristalinas dispersas, sendo o restante amorfo. Polímeros semicristalinos são formados por pequenas regiões cristalinas, denominadas cristalitos. Os cristalitos possuem um alinhamento que são intercaladas com regiões amorfas compostas de moléculas orientadas aleatoriamente. As estruturas semicristalinas são formadas durante o processo de resfriamento a partir do estado fundido. O resfriamento lento fornece tempo para que maiores quantidades de cristalização ocorram. Já uma taxa mais rápida, produzirá materiais altamente amorfos (Banik. 2006).

Banik (2006) cita que a cristalinidade determina várias propriedades do moldado. Sendo que existe uma relação direta entre o grau de cristalinidade e o peso da peça. Outras características, tais como resistência à deformação e o módulo de Young, aumentam proporcionalmente ao grau de cristalinidade. Na maior parte dos polímeros, a combinação do cristalino e estruturas amorfas forma um material com propriedades vantajosas de resistência e rigidez. Semicristalinidade é uma propriedade desejável para a maioria dos plásticos, porque eles combinam a resistência de polímeros cristalinos com a flexibilidade do amorfo (BANIK, 2006).

Callister (2007) destaca que um dos primeiros modelos de arranjo espaciais aceitos foi o de miscela franjada mostrada na Figura 2.1.

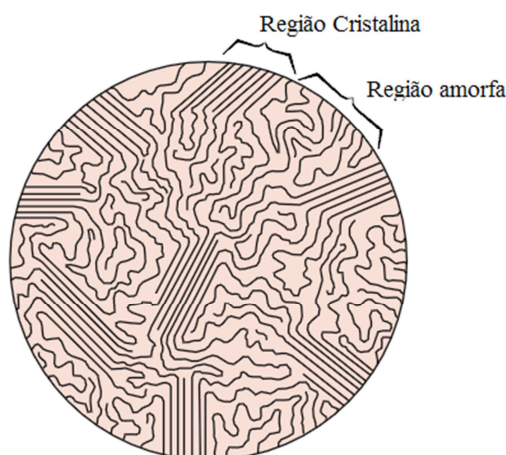


Figura 2.1 - Modelo miscela franjada, mostrando a região cristalina e amorfa em um polímero semicristalino (CALLISTER, 2007).

Para este modelo, um polímero semicristalino é constituído por pequenas regiões cristalinas, a qual é alinhada de maneira ordenada, que são incorporadas no interior de uma matriz amorfa, composta de moléculas orientadas aleatoriamente.

No modelo de lamelas, os cristais crescem a partir do resfriamento de soluções diluídas e foram observados pela primeira vez em 1950. Estes cristais são formados por placas muito finas, com cerca de 10 a 20 nanômetros de espessura, como ilustrado na Figura 2.2, chamadas de lamelas. Como a espessura da lamela é muito pequena em relação ao comprimento da cadeia molecular, estas devem estar dobradas sobre si mesmo, ficando assim conhecido como modelo das cadeias dobradas (CALLISTER, 2007).

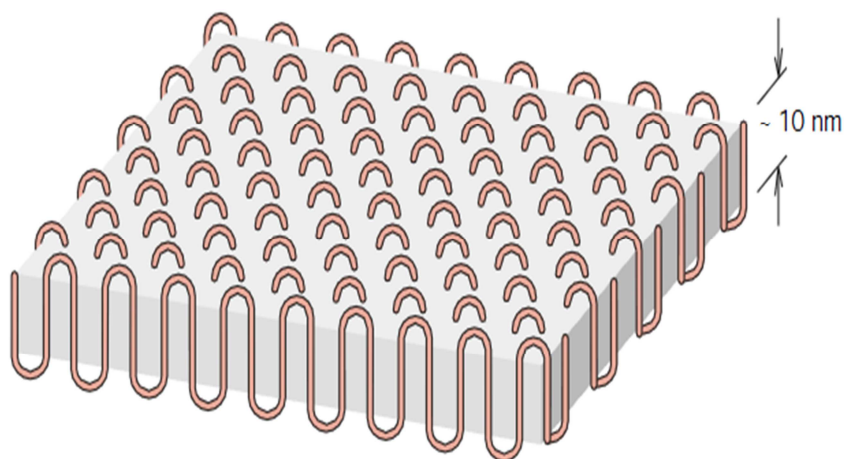


Figura 2.2 - Modelo da cadeia dobrada (CALLISTER, 2007).

Hoffman (1993) enfatiza que o arranjo representado pelos modelos de miscela franjada e de lamelas organizam-se em estruturas maiores, também organizadas, denominadas de esferulitos. Quando um polímero cristalizável é fundido e resfriado ocorre à cristalização através de núcleos individuais. A taxa de crescimento das estruturas é dependente da diferença entre a temperatura de fusão do polímero em questão e a temperatura de cristalização (T_c).

Callister (2007) relata que os esferulitos, Figura 2.3, são formados por lamelas que irradiam a partir de um único sítio de nucleação, localizado no centro. Os cristais lamelares são separados por uma região amorfa. Estas partes amorfas acabam formando laços entre si, atuando como elo entre as lamelas.

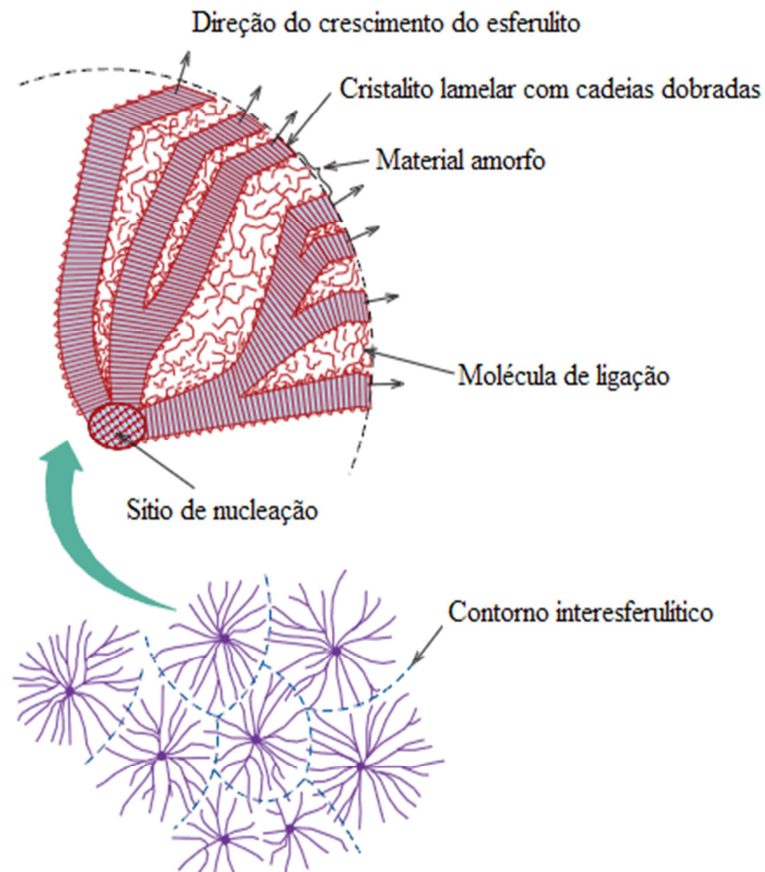


Figura 2.3 - Representação esquemática da estrutura detalhada de um esferulito (CALLISTER, 2007).

Conforme Callister (2007), os esferulitos possuem a forma esférica, mas à medida que crescem colidem com outros esferulitos também em formação, desta maneira o contorno do esferulito passa a ter uma forma mais linear, Figura 2.4.

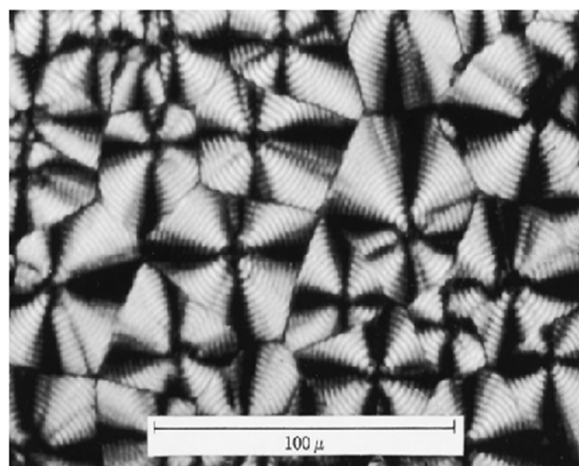


Figura 2.4 - Micrografia óptica mostrando a estrutura de um esferulito de polietileno (CALLISTER, 2007).

Através da microscopia por luz polarizada, em função da birrefringência dos cristais, é vista no interior de cada esferulito uma cruz de malta. Ojeda (1996) afirma que o tamanho dos esferulitos depende da razão entre a taxa de crescimento e a taxa de nucleação. Estas taxas são funções do próprio material e das condições de cristalização.

Conforme Cavalheiro (2007), outra forma possível de estrutura é o “*shish-kebab*”, que ocorre quando um polímero é cristalizado rapidamente a partir de uma solução diluída, sob alto cisalhamento, formando assim moléculas fortemente orientadas na direção do fluxo.

A Figura 2.5 representa um modelo desta estrutura, contendo longas cadeias, formadas por um cilindro central, tendo alguns pontos de crescimentos laterais de lamelas (CANEVAROLO, 2006). Stern (2005) afirma que elas podem influenciar significativamente as propriedades mecânicas como a de tração.

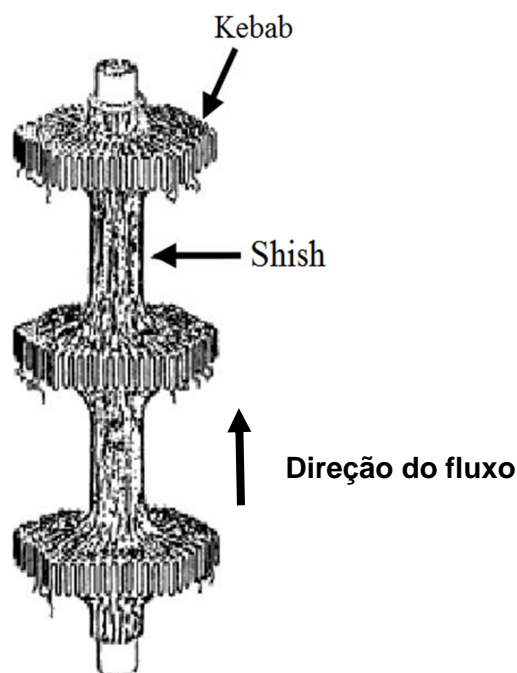


Figura 2.5 – Modelo de estrutura *Shish-Kebab* (Somani *et al.*, 2005).

Segundo Callister (2007), para verificação das propriedades mecânicas dos polímeros são utilizados praticamente os mesmos métodos usados para os metais. Propriedades como o módulo de elasticidade, o limite de resistência à tração e as resistências ao impacto e à fadiga, são comumente utilizados em polímeros.

A compreensão dos mecanismos de deformação de polímeros é importante, para o gerenciamento das características mecânicas dos polímeros (CALLISTER, 2007). A Figura 2.6 (a) representa a fase de deformação elástica para polímeros semicristalinos. As lamelas ordenadas são separadas por regiões amorfas que são as primeiras a serem solicitadas e esticadas na direção da tensão aplicada. A partir deste ponto, o aumento da tensão pode provocar também um alongamento (Δt) reversível da espessura da lamela (E), que são unidas por fortes ligações covalentes. A Figura 2.6 (b) ilustra o início da fase plástica onde as lamelas se inclinam de modo que as cadeias dobradas tornam-se alinhadas ao sentido da tensão. Por fim, a Figura 2.6 (c) ilustra a fase plástica na qual as forças das ligações são vencidas e ocorre o desprendimento de blocos cristalinos das lamelas.

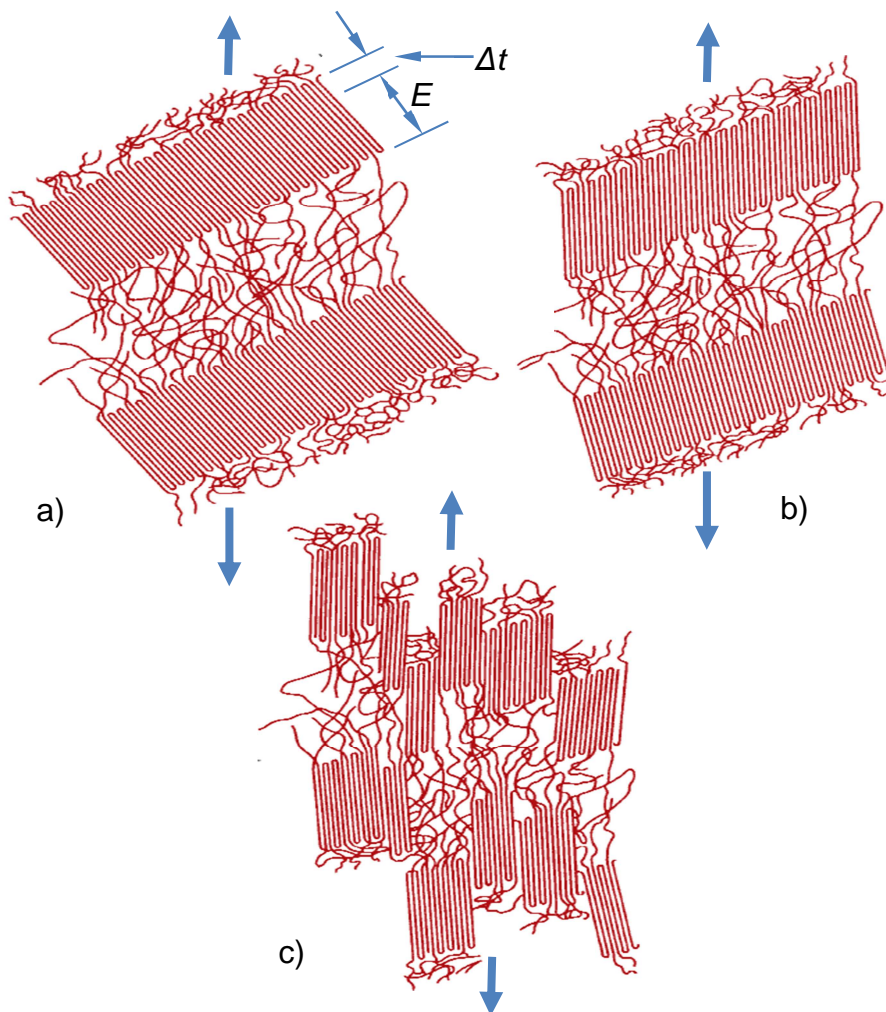


Figura 2.6 – Deformação em um polímero semicristalino. a) deformação elástica; b) início da deformação plástica; c) deformação plástica (Adaptado de Callister, 2007).

Stern (2005) afirma que algumas propriedades de tração, como a tensão de escoamento, estão relacionadas a energia necessária ao desdobramento do arranjo das lamelas. SCHRAUWEN *et al.* (2004) confirmam esta relação em seus estudos e afirmam que a tensão de escoamento é dependente da espessura e densidade dessas lamelas. Por fim, Séguéla (2002) *apud* Stern (2005) afirma que para o polietileno e polipropileno a tensão de escoamento na tração é mais influenciada pela espessura das lamelas, do que pela cristalinidade do polímero.

2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO

Segundo Thyregod (2001), a moldagem por injeção é um dos processos de fabricação mais utilizados na manufatura de produtos poliméricos. Maier e Calafut (1998) explanam que quase um terço do consumo de polímeros é processado por meio de moldagem por injeção. O processo é capaz de produzir peças complexas, finalizadas em uma única operação, de forma rápida e automática (STERN, 2005).

Conforme Maier e Calafut (1998), a alta pressão necessária para injetar o polímero e a complexidade de fabricação do molde, fazem com que a injetora e o molde de injeção tenham custos elevados. A capacidade de produzir uma peça completamente terminada, em um tempo extremamente curto, é que equilibra a equação e faz com que a moldagem de injeção seja altamente rentável.

Thyregod (2001) cita que a moldagem por injeção evoluiu a partir da fundição de metal, no entanto, ao contrário dos metais, os materiais poliméricos fundidos tem uma viscosidade elevada e não podem ser simplesmente vazados em um molde. Para que o polímero preencha o molde, é necessário que o mesmo seja injetado. Segundo Malloy (1994), o molde de injeção pode ser definido como um conjunto de placas, que comportam em seu núcleo a cavidade, responsável em dar a formar a peça a ser injetada.

Provenza (1991) relata que a máquina responsável pela injeção é denominada como injetora, e podem ser classificadas em vertical ou horizontal, sendo que a horizontal é a mais utilizada. Conforme Maier e Calafut (1998) e Provenza (1991), apesar das diferenças entre as máquinas, todas possuem as mesmas funções básicas:

- Dosagem do polímero dentro do cilindro de injeção;

- Plastificação do material até a temperatura ideal de injeção;
- Injeção do polímero no interior do molde;
- Resfriamento e solidificação do produto injetado;
- Abertura e extração do produto do molde;

Vários autores relatam diferentes formas de classificar as variáveis envolvidas no processo de injeção. Algumas são consenso entre autores como: Rosato e Rosato (1994), Malloy (1994), Dupont (2013) e Thyregod (2001), os quais dividem as variáveis em:

- Variáveis de controle do processo: conhecida também como as macro variáveis a serem controladas e são responsáveis pelas características finais do moldado (CAVALHEIRO, 2007).

- Variáveis de controle da máquina: são designadas também como parâmetros operacionais. É através do ajuste destes parâmetros que o controle do processo é feito, ou seja, de maneira indireta: o operador regula a máquina e a máquina atua sobre o processo (CAVALHEIRO, 2007).

Os parâmetros operacionais serão tratados daqui em diante pelo termo mais conhecido usualmente “parâmetros de injeção”. Existe um grande número de parâmetros de injeção e que são amplamente abordados na literatura (MENGES, MICHAELI e MOHREN, 2000). A Tabela 2.1 demonstra as variáveis de controle de processo e seus principais parâmetros de injeção.

Tabela 2.1 – Variáveis de controle do processo com os principais parâmetros de injeção.

Variáveis de controle do processo	Principais Parâmetros de Injeção
Temperaturas	Temperatura do cilindro/fundido
	Temperatura do molde
Pressões	Pressão de injeção
	Pressão de recalque
	Contrapressão
Velocidades	Velocidade de injeção
	Velocidade de rotação do fuso
Tempos	Tempo de resfriamento
	Tempo de recalque

2.3 POLIPROPILENO

O PP é o termoplástico mais utilizado no Brasil, totalizando 25% de todo termoplástico consumido, seguido pelo polietileno de alta densidade com 21% (ABIPLAST, 2010). A injeção é uma das técnicas de processamento mais utilizadas para converter a resina de PP em produtos comerciais. Cerca de 39% dos produtos de PP no Brasil são transformados pelo processo de injeção (ABIPLAST, 2010).

Ojeda (1996) propõe que a razão para essa enorme aceitação do PP, pode estar atribuída ao baixo custo do monômero e a eficiente tecnologia de polimerização. O baixo preço aliada a possibilidade de modificação do polímero para uma variedade de aplicações seja por exigência térmica ou mecânica, torna o PP uma “commodity” entre os polímeros.

Mano e Mendes (2004) descrevem que a taticidade é o tipo de arranjo estereoregular que o polímero pode apresentar. Para o PP as seguintes taticidades podem existir: isotático, sindiotático e atático. No PP isotáticos, todos os grupos laterais são dispostos de um mesmo lado do plano definido pelos átomos da cadeia principal. No sindiotático esta disposição é alternada e no atático não existe nenhuma regularidade nesta disposição (CANEVAROLO, 2006).

Conforme Azeredo (2010), o iPP (polipropileno isotático), por possuir certa regularidade no arranjo sequencial, possui um alto grau de cristalinidade. A configuração isotática do PP é a que tem obtido melhores aplicações industriais e por isso é a mais importante comercialmente (AZEREDO, 2010).

O PP pode ser dividido em três diferentes tipos; os homopolímeros, copolímeros aleatórios e os copolímeros heterofásicos. Azeredo (2010) afirma que o PP homopolímero, cuja fórmula molecular é $(C_3H_5)_x$, contém somente propileno na cadeia polimérica conforme mostrado na Figura 2.7.

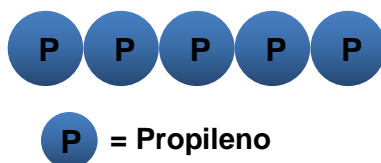


Figura 2.7 – Representação da estrutura molecular do PP homopolímero (Adaptado de Callister, 2007).

Possui elevada rigidez e resistência, porém a baixas temperaturas apresentam baixa resistência ao impacto e propriedades óticas não adequadas para algumas aplicações (AZEREDO, 2010).

Corrêa (2007) cita que os copolímeros aleatórios, também conhecidos como randômicos podem possuir um ou mais tipos de comonômeros na cadeia, sendo que o comonômero mais comumente utilizado é o etileno, ilustrado na Figura 2.8. A adição de etileno varia geralmente entre 1 e 7% fazendo com que a regularidade da cadeia seja prejudicada o que aumenta a mobilidade da cadeia, reduzindo assim a cristalinidade do polímero, melhorando suas propriedades ópticas e de impacto.



Figura 2.8 – Representação da estrutura molecular do PP copolímero randômico (Adaptado de Callister, 2007).

Os copolímeros heterofásico são empregados em produtos que requerem elevada resistência ao impacto, mesmo sob baixas temperaturas (CORRÊA, 2007). Grestenberger, Potter e Grein (2014) citam que estas características são importantes para a indústria automobilística, a qual utiliza este polímero na fabricação de painéis, para-choques e revestimentos das portas dos automóveis.

Os copolímeros heterofásicos, conforme Corrêa (2007), são formados por uma matriz de polipropileno onde se encontra disperso um outro copolímero; geralmente de etileno-propileno (EPR - *Ethylene Propylene Rubber*) com características elastoméricas, como demonstrado na Figura 2.9.

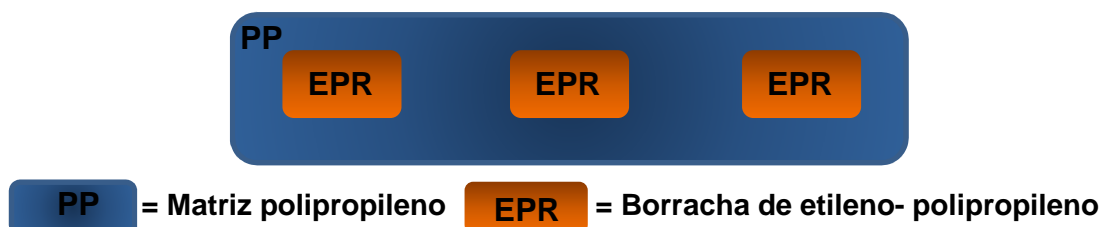


Figura 2.9 – Representação da estrutura molecular do PP copolímero heterofásico (Adaptado de Callister, 2007).

Conforme Botha (2014), geralmente este PP é produzido por polimerização em dois reatores diferentes, onde uma matriz de PP isotático é produzido no primeiro reator e transferido para o segundo reator, em que o etileno é introduzido em conjunto com propileno.

Ojeda (1996) cita que a presença de EPR reduz a rigidez do material, por causa da fácil deformabilidade das partículas do elastômero. A resistência ao impacto é então aumentada, sendo que a propagação da trinca, ao atingir uma partícula de borracha, tem suas tensões espalhadas em diversas direções. Parte desta energia mecânica é dispersa como deformação elástica do elastômero. Ainda segundo o autor, a adição de uma segunda fase, aumenta o espalhamento da luz, reduzindo a transparência e o brilho.

2.4 MORFOLOGIA DO PP INJETADO

Azeredo (2010) cita que no processo de injeção, durante a fase de preenchimento do molde, ocorre o início do resfriamento do polímero fundido e, com isso, tem-se o início da cristalização. A cristalização ocorre da parede para o centro da espessura do produto injetado. Formam-se, ao longo da espessura, várias camadas com cristalinidade e graus de orientação molecular variável, o que geram na peça propriedades únicas.

Viana (2004) ressalta que as propriedades do polímero juntamente com a magnitude destas camadas e do seu estado morfológico determinam o comportamento mecânico do moldado.

Ojeda (1996) afirma que o PP apresenta polimorfismo, isto é, pode apresentar-se nas formas cristalográficas alfa (α), beta (β) e gama (γ). Ainda segundo Ojeda (1996), a forma cristalina alfa é a mais comum e termodinamicamente mais estável. Possui célula unitária monoclinica sendo que sua temperatura de fusão é de 186°C. A forma cristalina β possui célula unitária hexagonal. Pode ser encontrada em pequenas quantidades e formam-se em situações especiais como processamento a baixas temperaturas ou em cristalização sobre cisalhamento que é o caso do processo de injeção (VIANA, CUNHA e BILLON, 2001). A temperatura de fusão dos cristalitos da forma β é de 145° a 150°C (OJEDA, 1996). Segundo Santos (2011), a forma cristalina gama é rara e possui

célula unitária ortorrômbica e pode ser gerada por cristalização a altas pressões (entre 100 a 200MPa).

Cavalheiro (2007) estudou a influência dos parâmetros de injeção na estrutura e propriedades de peças de paredes espessas e finas de PP isotático e analisou o grau de cristalinidade da fase α e β através da difração por raios X (WAXD), para algumas combinações de parâmetros de injeção. A fase β apresentou um valor máximo de 5% de cristalinidade. Esses valores foram encontrados na camada mais externa do moldado, sendo que para a região do núcleo, os valores da fase β alcançaram valores desprezíveis. Tjong *et al.* (1996) *apud* Machado (2002) verificaram que as propriedades mecânicas da fase β no iPP diferem da fase α iPP, porém estes 5% encontrados por Cavalheiro (2007) demonstraram não influenciar as propriedades mecânicas das amostras por ele ensaiadas. Outros autores como Almeida, Branciforti e Bretas (2007) e Viana, Cunha e Billon (2001) também analisaram a quantidade de fase β em peças injetadas encontrando valores próximos aos 5% descritos anteriormente.

Fujiyama, Wakino e Kawasaki (1988) descreveram que observando amostra de iPP através de microscopia óptica e difração por raios X, é possível distinguir duas regiões: uma camada mais externa, denominada pele, e o núcleo, cada uma delas com diferentes graus de orientação e cristalinidade, bem como diferentes morfologias. A pele é geralmente altamente orientada, pouco cristalina e pouco esferulítica. A camada do núcleo é caracterizada por ser esferulítica, com pouca ou nenhuma orientação (FUJIYAMA e WAKINO, 1991 e STERN, 2005).

Conforme a resolução utilizada durante a microscopia, podem-se identificar outras camadas. Com isso alguns autores investigando a morfologia do iPP injetado descobriram a existência de outras camadas. Kantz (1972); Katti (1982) e Chen (2001) *apud* Bollin (2010) relataram uma terceira camada, que seria uma transição entre a pele e o núcleo, conhecida como zona de cisalhamento. Segundo Stern (2005), o cisalhamento que atua durante o fluxo de material fundido conduz a processos de atrito interno e conseqüentemente ao aumento da temperatura local.

Fitchmun (1973); Mencik (1973) e Trotignon (1987) *apud* Bollin (2010), afirmam haver quatro camadas, como mostrado na Figura 2.10, sendo a configuração mais aceita e utilizada por diversos autores. A pele (a) é a que possui a menor cristalinidade entre todas as camadas sendo altamente orientada pelo fluxo elongacional. Mendoza *et al.* (2003) citam que a pele pode possuir uma

crystalinidade de cerca de 5% a 10% menor que o restante da espessura do moldado. A zona refinada (b), por possuir uma região com menor taxa de resfriamento e na qual ainda não há um fluxo de cisalhamento expressivo, possui um maior nível de cristalinidade, comparada com a pele, sendo composta por esferulitos finos. A zona de cisalhamento (c) é composta predominantemente por *shish-kebabs*. O núcleo (d) possui aparência granulosa e é composto por esferulitos relativamente grandes. Os limites entre as zonas não são claras, e as medidas de cada camada irá depender exclusivamente do observador (BOLLIN, 2010).

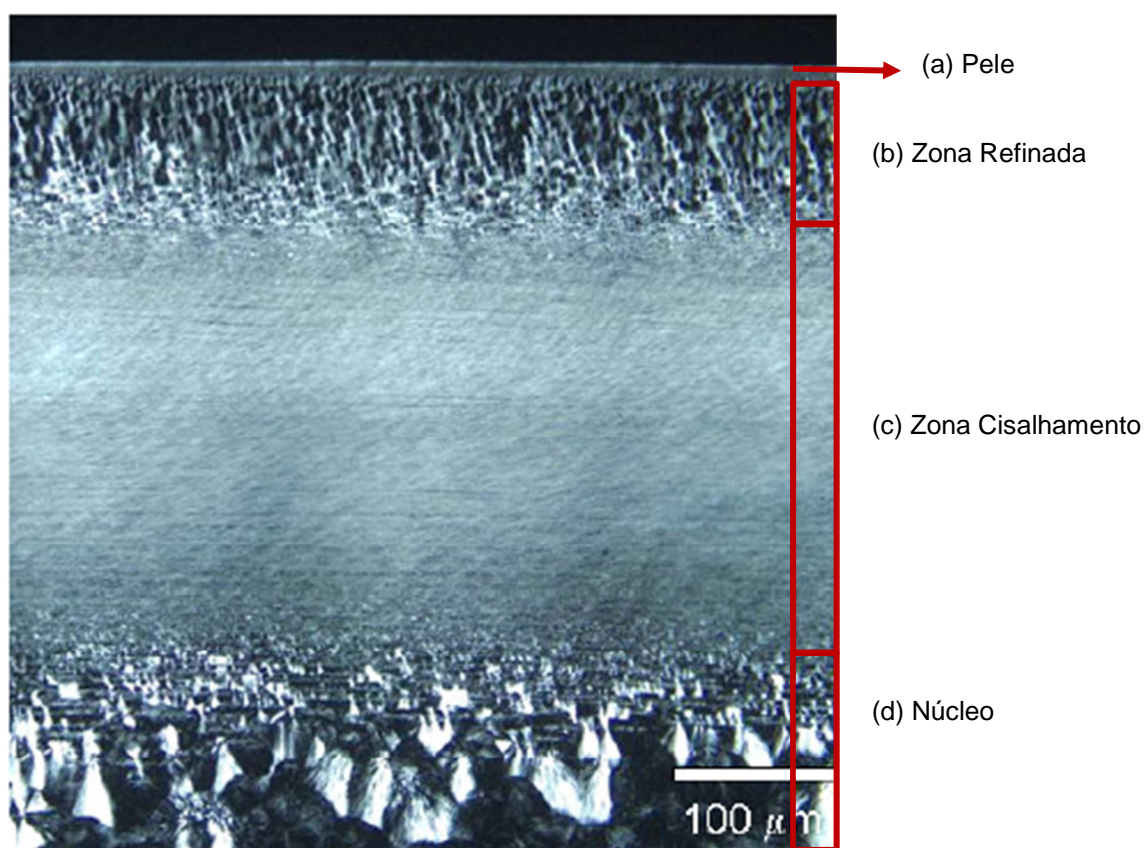


Figura 2.10 - Definição de zonas de microscopia óptica do iPP (Adaptado de BOLLIN, 2010).

Mirabella *et al.* (2004) estudaram a morfologia e orientação molecular do PP copolímero heterofásico e do homopolímero. Através de microscopia óptica e de dicroísmo de infravermelho foi analisada e mensurada o grau de orientação das diferentes camadas encontradas. Para o PP homopolímero, assim como observado por Bollin (2010), a camada mais orientada foi a pele, sendo que no núcleo a orientação é quase zero como mostrado na Figura 2.11.

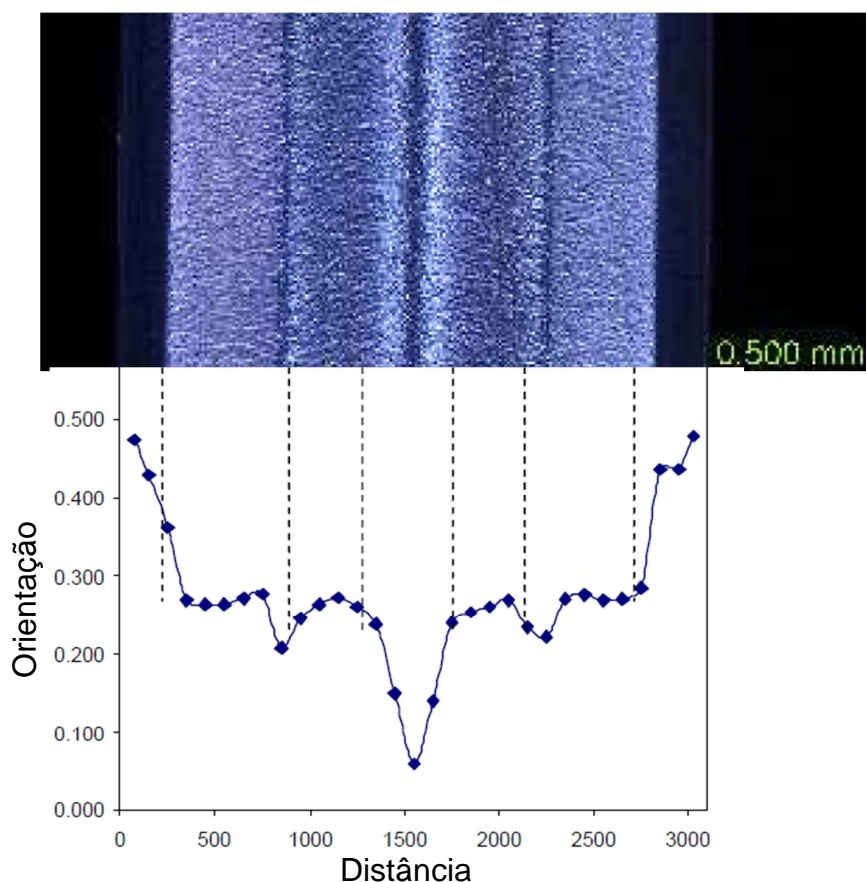


Figura 2.11 – Orientação para o PP homopolímero injetado (Adaptado de Mirabella *et al.*, 2004).

Ainda conforme Mirabella *et al.* (2004), o PP copolímero heterofásico também apresentou a pele bem orientada, conforme ilustrado na Figura 2.12. Afastando-se da pele a orientação molecular começa a diminuir. Porém, ao se aproximar do núcleo a orientação volta a aumentar, apresentando assim um comportamento bem distinto do PP homopolímero. A autora cita que a causa desta orientação é desconhecida mas se correlaciona com as faixas apresentadas no centro da micrografia.

A orientação do núcleo já havia sido observada por Fujiyama e Azuma (1979) no qual, os autores citam que esta orientação do núcleo funcionaria como um reforço dos corpos de provas utilizados durante os teste de impacto pelos autores. Além disso, Bollin (2010) afirma que as inclusões de borracha atuam como nucleador, resultando esferulitos menores. A inclusão de apenas 5% de borracha pode levar a uma redução de até 50% no tamanho dos esferulitos, segundo autor.

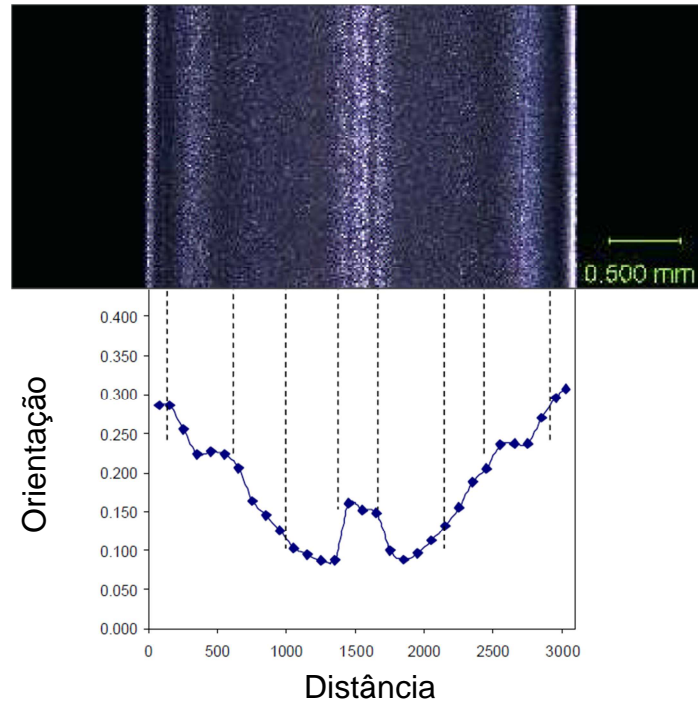


Figura 2.12 – Orientação para o PP copolímero heterofásico injetado (Adaptado de Mirabella et al., 2004).

Conforme Cavalheiro (2007), a pele é denominada por muitos autores como “camada congelada”, e é constituída pela região que está diretamente em contato com a parede do molde na fase de preenchimento como ilustrado na Figura 2.13. Sua espessura e morfologia dependem de complexos campos termodinâmicos a que está sujeita.

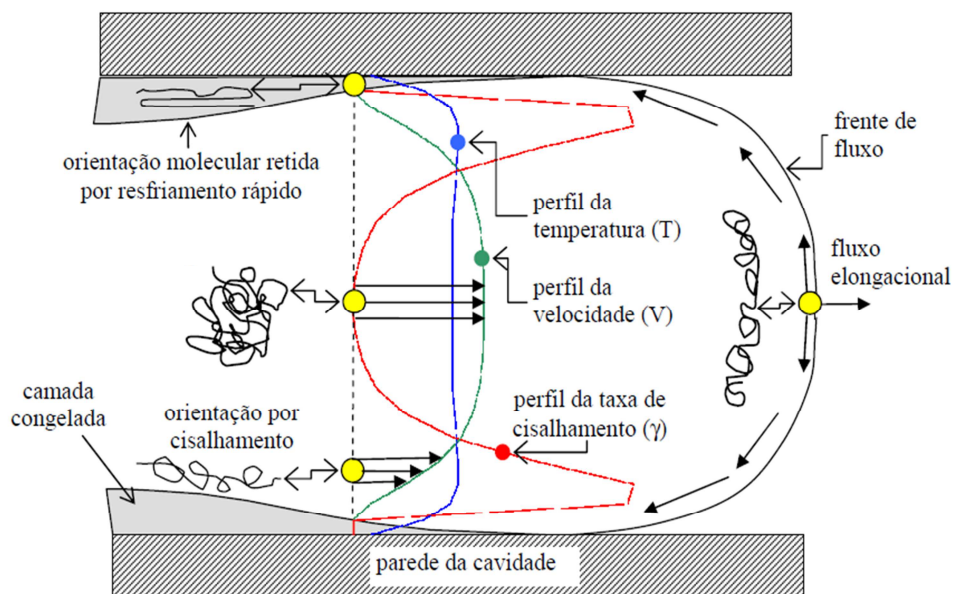


Figura 2.13 - Representação esquemática do fluxo durante o processo de injeção (adaptado de CAVALHEIRO, 2007).

Viana (2004) evidencia que a camada congelada provoca uma redução na secção transversal do fluxo e a criação de uma barreira de isolamento, devido à baixa condutividade térmica do polímero, conduzindo a uma taxa mais lenta de arrefecimento do polímero localizado no núcleo. Devido ao efeito de isolamento térmico das camadas congeladas, o polímero fundido do núcleo é capaz de relaxar mais lentamente, levando a uma orientação molecular baixa nesta zona (BANIK, 2006).

Stern (2005) explana que durante o processo de injeção, o núcleo é altamente viscoso e possui velocidade mais elevada. O autor cita que o fluxo elongacional é formado quando o material a frente do fluxo toca a parede fria do molde, sendo então o material esticado e resfriado na direção do fluxo. Assim, o fluxo elongacional leva a deformação e orientação das macromoléculas. Como resultado, as camadas exteriores a superfície da peça são altamente orientadas (STERN, 2005).

2.5 MOLDES-PROTÓTIPO

Moldes de injeção são ferramentas que possuem alto custo e tempo de fabricação. O material utilizado bem como as técnicas de construção são os fatores principais ligados a este alto custo (AMORIM, 2006).

Para Netto (2003), a fabricação de moldes-protótipo surgiu como uma alternativa para o processo de desenvolvimento integrado de produtos em termoplásticos. Sua utilização pode validar tanto o produto injetado, como o projeto do próprio molde.

Diferentes técnicas de fabricação podem ser utilizadas na obtenção do molde-protótipo (VOLPATO e AMORIM, 2005). Entre estas técnicas estão a do ferramental rápido (RT – *Rapid Tooling*), que utiliza a manufatura aditiva (AM - *Additive Manufacturing*) e a usinagem CNC (VOLPATO E AMORIM, 2005).

Um dos requisitos na fabricação do molde-protótipo usinado é que o mesmo seja obtido de forma rápida. Para isso, o material alternativo escolhido na fabricação deverá ter boa usinabilidade, seja pelo processo de remoção de cavaco ou por eletroerosão (BARETA *et al.*, 2006).

Gryzinski (2011) explana que entre os materiais mais utilizados na fabricação de moldes-protótipo usinados estão as resinas termofixas e ligas, como as de alumínio, de cobre e de zinco. Amorim (2006) relata que as resinas apesar de serem de fácil usinagem, são frágeis, o que pode levar a quebra e lascamento do material durante a usinagem. Outro ponto destacado pelo autor é que as resinas são materiais que não conduzem eletricidade, o que inviabiliza o seu uso no processo de eletroerosão, sendo este processo bastante utilizado nas ferramentarias para obtenção de moldes.

Dentro deste cenário, surgem então as ligas de zinco, que possuem ótima usinabilidade e baixo custo de aquisição (GRYZINSKI, 2011). Armstrong (2013) relata que a liga de zinco já é muito utilizada na fabricação de moldes-protótipo. Porém com o advento da RT as ligas de zinco ressurgem com ainda mais força. A partir da AM, por exemplo, pode ser criado um modelo em gesso, na qual as cavidades moldantes serão fundidas, podendo ou não, sofrerem posteriormente usinagem, dependendo da exigência do projeto. Esta técnica diminui significativamente o tempo médio de fabricação.

As ligas de zinco possuem várias denominações, sendo as mais comuns kirksite e zamac (MENGES, MICHAELI e MOHREN, 2000). O nome zamac tem sua origem das primeiras letras dos elementos que o constituem: Z de zinco, A de alumínio, MA de magnésios e C de cobre (GRYZINSKI, 2011). Estas ligas são formadas por mais de 90% de zinco. Existem diferentes classes de zamac, sendo que possuem diferentes percentuais de alumínio na sua composição. No zamac-2 o teor de alumínio é de 2%, já no zamac-8 pula para 8% (MAZAK, 2008 *apud* GRYZINSKI, 2011).

Segundo Gryzinski (2011), entre os materiais destinados a usinagem de moldes-protótipo, o zamac é o que possui o menor custo de aquisição, sendo que suas características físicas, química, mecânicas e de usinabilidade ficam próximas ao alumínio que possui um custo bem mais elevado.

2.6 PROTÓTIPOS FUNCIONAIS

Chen (2001) afirma que com a evolução dos computadores, a demanda por protótipos físicos diminuíram nos últimos anos. Existem no mercado vários

programas de simulação que permitem a análise da funcionalidade do produto. Estes programas podem ajudar os projetistas a avaliar seus projetos de forma rápida e barata. Infelizmente, apesar da promessa de tais ferramentas de simulação, nem todos os aspectos do teste do projeto podem ser formulada em modelos matemáticos. Com produtos e processos cada vez mais complexos, a confiança e precisão de um protótipo de sistema virtual pode ainda não ser capaz de satisfazer as expectativas do projetista. Portanto, protótipos físicos ainda são fundamentais para produtos finais com uma qualidade superior.

Volpato (1999) relata que com o surgimento das tecnologias de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* - RP), no final dos anos 80, a qual é baseada na manufatura aditiva, a obtenção de protótipos físicos tornou-se mais fácil e rápida. Ainda segundo o autor, no início, a RP procurava obter protótipos físicos para visualização e manipulação, sem considerar muito a sua função e desempenho. Porém novas exigências foram surgindo em relação ao protótipo, como aumento da qualidade e a necessidade de executar testes funcionais.

Normalmente, protótipos em plástico obtidos por AM funcionam bem para visualização e testes de montagem, mas são normalmente fracos para testes funcionais (JACOBS, 1996; PALM, 2006 *apud* PINHEIRO, 2008). Siegel, Volpato e Gaebler (2008) citam que diferentes de simples protótipos, os protótipos funcionais como indica o nome, permitem a realização de funções para as quais foram concebidos. Para isso, é preferível que o mesmo seja fabricado com o mesmo material da peça final. Alguns processos de produção como é o caso da injeção de polímeros fazem com que as peças injetadas possuam características únicas. Neste caso, o protótipo funcional deverá ser fabricado pelo mesmo processo, a fim de garantir as mesmas propriedades mecânicas do produto que irá posteriormente entrar em produção (VOLPATO *et al.*, 2006).

2.7 INFLUÊNCIA DO MATERIAL DO MOLDE-PROTÓTIPO NO MOLDADO

Muktevi (2011) cita que a seleção do material do molde é uma decisão importante para qualquer projeto de molde. Quando um molde de produção é construído, custo e tempo são importantes, mas quando comparados com a possibilidade de desgaste prematuro e falha da ferramenta, a durabilidade é o fator

chave. Já na obtenção um molde-protótipo o mesmo precisa ser construído rapidamente. Neste caso, tempo de construção e os custos de fabricação são considerações importantes para um molde-protótipo e não a durabilidade do mesmo a longo prazo.

Alguns autores citam que a escolha de diferentes materiais na fabricação do molde, exerce influência nas propriedades finais do moldado. Segundo Mateus *et al.* (2007), essas diferenças nas propriedades do moldado se devem aos diferentes valores de condutividade térmica dos materiais utilizados na fabricação desses moldes. Silva *et al.* (2007) relatam que a transferência de calor entre o moldado e o material do molde tem um efeito importante sobre a cinética da cristalização e, conseqüentemente na microestrutura e as propriedades mecânicas finais do moldado. Harris *et al.* (2004), realizaram um estudo sobre o grau de cristalinidade utilizando DSC, entre peças injetadas em poliamida 6,6 em um molde de resina Vantico 5190, obtido por estereolitografia e outro em alumínio. O resultado mostrou um aumento de 30% no grau de cristalinidade no moldado em molde de resina em relação a amostras injetadas em molde de alumínio, o que resultou em diferentes contrações no moldado, sendo de 2,73% para o molde de estereolitografia e 1,34% para o molde de alumínio. Ozcelik, Ozbay e Demirbas (2010) em seus estudos observaram uma diferença entre 10 a 20% nas propriedades mecânicas do PP injetado em molde de alumínio e outro injetado em aço 1020. Gryzinski (2011) comparou o limite de resistência à tração entre o moldado em PP, injetado em molde de zamac 8 e outro em aço 1045 e observou uma variação de 8%, valor próximo aos 6% encontrado por Baretta *et al.* (2006), o qual utilizou um molde em aço P20 e outro em zamac 5 para a injeção das amostras em PP.

2.8 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO NA ESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MOLDADO

Cavalheiro (2007) cita nos seus estudos que parte das características das peças injetadas deve-se ao ambiente termodinâmico a que elas foram submetidas durante o processo de injeção. Alguns fatores contribuem para esse ambiente como o material a ser injetado, a geometria da cavidade e dos canais de alimentação, o material do molde e principalmente dos parâmetros de injeção.

Yang *et al.* (2012) enfatiza que o controle da morfologia através dos parâmetros de injeção de polímeros semicristalinos é de grande importância, pois este afeta as propriedades físicas, mecânicas e ópticas do moldado.

Henke, Smith e Abbott (1975) pesquisaram o efeito da temperatura do molde (T_{Molde}) na morfologia e na propriedade mecânica de impacto do polipropileno copolímero. Maiores temperaturas de molde geraram moldados com pouca espessura de pele e maiores esferulitos. Para as menores temperaturas de molde foi observado uma ordem inversa, havendo crescimento na espessura de pele e menores tamanhos de esferulitos. Através do impacto izod percebeu-se haver uma diminuição na energia de impacto quando a T_{Molde} era aumentada. Os pesquisadores citam que este fato se deve ao aumento do tamanho dos esferulitos. Por fim os autores concluem que boas propriedades de impacto estão relacionadas com pequenos e médios tamanhos dos esferulitos.

Wright e Dunk (1988) analisaram o efeito do grau de cristalinidade das propriedades do polipropileno GWM 22 homopolímero e do poliacetal injetado através da variação da T_{Molde} . O ensaio mecânico utilizado foi de tração para o polipropileno e poliacetal. Para o poliacetal além da tração também foi realizado o ensaio de impacto. Serão descrito aqui apenas os dados referentes ao polipropileno, que é o foco deste estudo. Para o moldado em polipropileno foi utilizado como temperatura do fundido (T_{Fund}) 230°C. A Tabela 2.2 demonstra as diferentes propriedades obtidas com a variação das temperaturas do molde para o moldado em polipropileno.

Tabela 2.2 – Resultados obtidos através da variação da temperatura do molde para o PP.

Temperatura do Molde (°C)	12	45	105
Cristalinidade por DSC (%)	43	46	48
Tamanho esferulitos (µm)	10	30	60
Espessura da pele (µm)	325	310	290
Tensão de tração (MPa)	34,4	35,8	36,9

Fonte: Adaptado de Wright e Dunk (1988).

Como conclusão os autores citam existir apenas um ligeiro aumento da cristalinidade e da tensão de tração para o PP quando a temperatura do molde é

alterado é alterada entre 12 e 105°C. Já nas propriedades morfológicas são evidentes as alterações, principalmente em relação ao tamanho dos esferulitos.

Mendoza *et al.* (2003) citam que os parâmetros de injeção influenciam a orientação morfológica, e que esta contribui para a qualidade do moldado. Os autores pesquisaram a contribuição da T_{Molde} e a velocidade de injeção da orientação do moldado de iPP. Dois níveis de T_{Molde} e de velocidade de injeção foram utilizados. Fatias de cerca de 35µm foram feitas ao longo de toda a espessura do moldado. A determinação da orientação morfológica dessas camadas foi feita através das figuras de polo obtidas por difração de raios x de altos ângulos. A orientação máxima foi obtida na zona de cisalhamento sendo que os autores citam que a velocidade de injeção tem grande influência na determinação da espessura dessa camada. A T_{Molde} utilizada foi de 20°C e 40°C, sendo que a mesma não modificou a orientação do moldado nesta faixa de temperatura. Tal variação da T_{Molde} não alterou significativamente a velocidade de arrefecimento do polímero, porém, mostrou ter influência sobre o relaxamento do estresse térmico, o que por sua vez influi na contração do moldado. Almeida, Branciforti e Bretas (2007) realizaram um estudo semelhante no iPP variando apenas a velocidade de injeção. A conclusão, assim como Mendoza *et al.* (2003), é que com o aumento da velocidade de injeção há um aumento da orientação morfológica sendo esta orientação maior na pele do que no núcleo do moldado.

Banik (2008) analisou efeito de diferentes T_{Molde} nas propriedades mecânicas do polibutileno tereftalato (PBT). O ensaio utilizado foi o de tração e impacto, considerados pelo autor como ensaios mecânicos de curta duração. Também foi realizado o ensaio de fluência, sendo este de longa duração. As T_{Molde} utilizadas pelo autor foram de 14, 40 e 60°C. Ao aumentar a T_{Molde} de 14°C para 60°C, houve um acréscimo de cerca de 4% na tensão de tração e um decréscimo de 2% na energia de impacto. No ensaio de fluência a diferença ficou em 9% para a mesma variação de temperatura. Os resultados indicaram que a influência T_{Molde} é pouco significativa a partir das propriedades de tração e de impacto o que mascara, segundo o autor, as grandes diferenças morfológicas existentes nos corpos de prova.

Nagaokaa *et al.* (2005) analisaram as influências dos parâmetros de injeção, tais como a velocidade de injeção, a T_{Fund} e a T_{Molde} , em relação às propriedades mecânicas de PP homopolímero e PP copolímero injetados através de um molde de co-injeção. Este tipo de molde permite a injeção de dois tipos de polímeros

diferentes para formar uma única peça. O tipo de material utilizado na fabricação do molde não foi citado em seu estudo. O autor relata que T_{Fund} parece exercer uma maior influência sobre a resistência à flexão do que sobre a resistência à tração. Ao se elevar a T_{Fund} para 230°C a resistência a tração do moldado aumenta. Aumentando-se ainda mais a temperatura, para 270°C diminui a resistência à tração, sendo uma das possíveis causas, a degradação do material. Mesmo assim, os autores concluem que T_{Fund} e a T_{Molde} podem ser usadas para ajustar as propriedades mecânicas do moldado em moldes injeção tipo sanduíche e que a velocidade de injeção não apresentou relação significativa com as propriedades mecânicas.

Cermák *et al.* (2005) investigaram os efeitos da T_{Molde} e da pressão de recalque sobre a morfologia do iPP, sendo que o material utilizado na fabricação do molde não é informado pelos autores. A microscopia de luz polarizada revelou um forte efeito de T_{Molde} sobre a morfologia, seja na espessura da pele ou no tamanho dos esferulitos. Quanto à pressão de recalque pareceu não ter influência significativa. Com isso os autores concluem que determinadas características da estrutura tais como a espessura da pele, tamanho geral dos esferulitos e a distribuição morfológica são altamente sensíveis aos parâmetros de injeção. Em outro estudo Cermák *et al.* (2005) verificaram os efeitos da T_{Molde} e da pressão de recalque sobre a tensão a tração do iPP. O intervalo de temperatura utilizada do molde foi de 40 a 120°C. A cristalinidade obtida para estas temperaturas de molde foi de 43 e 46% respectivamente. Os resultados indicaram um forte efeito de T_{Molde} sobre o módulo de elasticidade, sendo que a pressão de recalque demonstrou não ter influência significativa.

O trabalho Tantakom e Schott (1998) investigou o efeito da T_{Molde} e da T_{Fund} em relação à densidade, orientação e resistência à tração de moldadas de policarbonato e ABS com paredes finas. Em relação à resistência a tração, com maiores T_{Molde} houve aumento na resistência a tração em ambos os materiais. Com maiores T_{Fund} , tal fato não foi observado, havendo inclusive diminuição da mesma, o que, segundo os autores, pode estar relacionado à degradação do material. Por fim, os autores concluem que o aumento da T_{Molde} mostrou-se ser a melhor estratégia para melhorar o processo de moldagem de parede fina.

Ozcelik, Ozbay e Demirbas (2010) compararam as propriedades mecânicas das amostras de ABS injetadas em moldes com diferentes materiais, sendo um em

liga de alumínio, série 2000 e outro em aço AISI 1020. As propriedades mecânicas avaliadas foram o módulo de elasticidade, resistência à tração e ao impacto. Para planejamento e análise dos resultados os autores utilizaram o método Taguchi seguido da análise da variância (ANOVA - *Analysis of variance*). Os parâmetros utilizados foram T_{Fund} , pressão de injeção, pressão de recalque e tempo de resfriamento, divididos em três níveis de ajuste. A conclusão foi que o mais importante parâmetro que afeta o módulo de elasticidade, a resistência à ruptura e à tração foi a T_{Fund} em ambos os moldes. Não foi explicado neste trabalho qual foi, e como foi controlada a T_{Molde} , o que pode ter contribuído para o resultado da análise. Os autores ainda apuraram que apesar do coeficiente de condutividade térmica ser quatro vezes menor no aço do que no alumínio, as propriedades mecânicas tiveram uma variação de apenas 10 a 20%.

Viana (2004) em seus estudos utilizou PP copolímero para verificar como os parâmetros influenciavam no desenvolvimento da pele. Os parâmetros investigados foram a T_{Fund} , T_{Molde} , velocidade de injeção e geometria do molde. Na análise dos resultados o autor também frisou, assim como Ozcelik, Ozbay e Demirbas (2010), a grande influência da T_{Fund} , e que o mesmo tem um forte efeito sobre a o desenvolvimento da camada de pele. A variação T_{Fund} faz com que temperatura de cristalização se aproxime ou afaste da temperatura de fusão, o que influencia diretamente na cristalização. O efeito da T_{Molde} , geometria do molde, e velocidade de injeção não tiveram efeitos significativos.

Salmoria *et al.* (2008) estudaram o comportamento térmico de moldes fabricados em uma resina de epóxi e alumínio durante a injeção de iPP PH 3515, da empresa Ipiranga Química. As propriedades analisadas no moldado foram a cristalinidade, a dureza e a resistência a tração, as quais foram comparadas a um moldado injetado em um molde em aço. Comparando as propriedades dos moldados obtidos em resina epóxi/alumínio com o moldado obtido em aço, os autores encontraram diferenças de cristalinidade de 17% entre os moldados. Já a dureza e a resistência à tração apresentaram resultados muito próximos ao moldado obtido no molde de aço. Os autores não discutem a relação entre a cristalinidade e os resultados encontrados para a dureza e a resistência a tração. Como observado em outros trabalhos, como o de Wright e Dunk (1988), diferentes cristalinidades deveriam implicar em propriedades mecânicas diferentes. Ainda durante os estudos de Salmoria *et al.* (2008), foi variada a T_{Molde} , cujos parâmetros utilizados foram 15,

32 e 75°C. A variação da T_{Molde} entre 15 e 75°C resultou em uma tensão de escoamento de 32 e 34MPa respectivamente, o que foi considerada pequena pelos autores.

Bareta (2007) comparou a cristalinidade obtida por DSC de um moldado em PP homopolímero H503 da marca Braskem injetado em um molde em aço P20 com outro moldado em um molde cuja parte fixa do molde era em P20 e a parte móvel em zamac-5. Para uma temperatura de molde em 30°C, o resultado da cristalinidade foi de 39,25% para o moldado em aço P20 e de 38,81% para o moldado no par aço P20 e zamac-5. O autor também variou a T_{Molde} entre 30 e 70°C, cujo percentual de cristalinidade resultante foi de 38,81 e 39,74% respectivamente. Os resultados demonstraram que a variação de cristalinidade foi menor que 1% entre os moldados para o intervalo de 30 e 70°C. A baixa variação na cristalinidade e a ausência da citação de réplicas e do desvio padrão nos resultados impedem de tirar maiores conclusões sobre os resultados obtidos pelo autor.

Com um objetivo similar ao que foi proposto para este trabalho, Godec, Sercer e Sokele (2008) estudaram e compararam a influência de um molde-protótipo e de um molde definitivo sobre o moldado em PP. O molde-protótipo foi obtido através da tecnologia RT, sendo que o material utilizado foi um aço de propriedade da empresa LaserForm A6 com posterior infiltração de bronze. O molde definitivo construído em aço 40CrMnMoS8 6 foi obtido através de usinagem. As propriedades analisadas foram a massa, o dimensional e a resistência ao impacto sob tração. Através da variação dos parâmetros: pressão e tempo de recalque, T_{Fund} e velocidade de injeção, os autores realizaram um modelo de otimização destes parâmetros aonde foi possível diminuir as diferenças encontradas nas propriedades analisadas. O parâmetro com maior influência sobre a resistência ao impacto sob tração segundo os autores é a T_{Fund} .

Fujiyama e Azuma (1979) analisaram a influência da variação da T_{Fund} e da relação pele/núcleo sobre as propriedades de impacto de um PP copolímero heterofásico de etileno. As T_{Fund} utilizadas variaram de 190 a 280°C. Através de microscopia de luz polarizada e de dicroísmo infravermelho os autores observaram que a medida que a T_{Fund} aumentava a espessura da pele altamente orientada diminuía. Na faixa de temperatura entre 220 e 250°C, uma região orientada era observada no centro do moldado, esta orientação também foi citada por Mirabella *et al.* (2004) o que, segundo os autores, pode ser formada durante a cristalização. Ao

aumentar a temperatura acima de 250°C esta região começa a diminuir. A máxima energia absorvida durante o impacto ocorreu entre 220 e 250°C, quando a máxima orientação no núcleo era observada. Desta maneira, os autores concluem que a energia de impacto absorvida é em grande parte dependente da orientação deste núcleo.

2.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No decorrer da revisão bibliográfica foi possível verificar que a morfologia e as propriedades mecânicas dos polímeros injetados dependem em grande parte do material do molde e dos parâmetros de injeção. Alguns autores que utilizaram material alternativo na fabricação do molde-protótipo citam haver diferenças nas propriedades mecânicas entre o moldado obtido neste tipo de molde e o moldado obtido em um molde de aço. Porém, são escassos os estudos que busquem alternativas para que essas diferenças sejam minimizadas. O único trabalho encontrado, durante esta revisão bibliográfica, objetivando estes resultados, foi o de Godec, Sercher e Sokele (2008). Neste sentido, este trabalho buscou explorar esta oportunidade de pesquisa, visando contribuir exatamente nesta direção, ou seja, analisar a possibilidade de minimizar estas diferenças, otimizando as temperaturas do molde e do fundido através de um método de regressão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as etapas envolvidas para o desenvolvimento deste estudo. O fluxograma da Figura 3.1 representa de forma resumida estas etapas que serão posteriormente detalhadas ao longo deste capítulo.

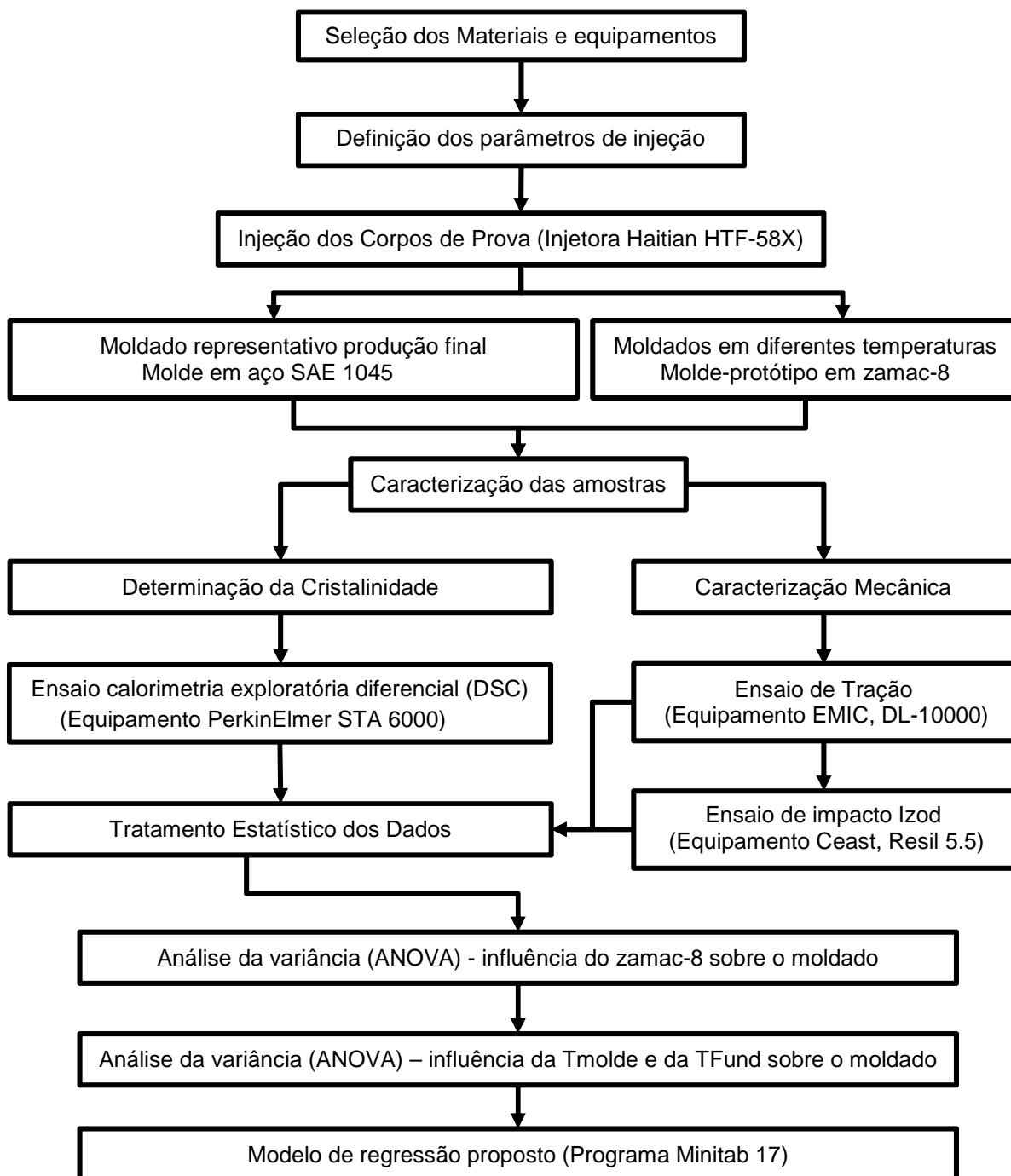


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas para o estudo

3.1 MATERIAL PARA O MOLDADO

O Polipropileno (PP) escolhido para este estudo é o CP-204, da fabricante Braskem S.A. Trata-se de um copolímero heterofásico de propileno e etileno, com um índice de fluidez de 22g/10min a 230°C/2,16kg, aditivado para uso geral. A melhora da resistência ao impacto a baixas temperaturas, quando comparada ao PP homopolímero, tem aumentado o consumo PP copolímero heterofásico, principalmente pela indústria automobilística (MAIER E CALAFUT, 1998). Este fato aliado à falta de pesquisas com este material foi determinante para a escolha do mesmo para este estudo. A Tabela 3.1 mostra algumas das propriedades mecânicas deste polímero.

Tabela 3.1 – Propriedades Mecânicas do PP CP-204.

Propriedades Mecânicas	Valor	Referência
Resistência à tração no escoamento	28MPa	ASTM D638
Alongamento no escoamento	8%	ASTM D638
Módulo de flexão secante a 1%	1,2GPa	ASTM D 790
Resistência ao impacto Izod (com entalhe) à -20°C	29J/m	ASTM D 256
Resistência ao impacto Izod (com entalhe) à 23°C	67J/m	ASTM D 256

Fonte: Braskem 2013.

3.2 GEOMETRIA DOS CORPOS DE PROVA

Para caracterização mecânica das amostras foram escolhidos os ensaios de tração e impacto. A norma utilizada foi a ASTM D-638/03 tipo IV para a tração e a ASTM D-256 para o ensaio de impacto Izod. Estas normas estabelecem a metodologia a ser utilizada para realização do ensaio, bem como define a geometria dos corpos de prova. A Figura 3.2 mostra a geometria necessária para o ensaio de tração e a Figura 3.3 para o ensaio de impacto Izod conforme prevista nas referidas normas.

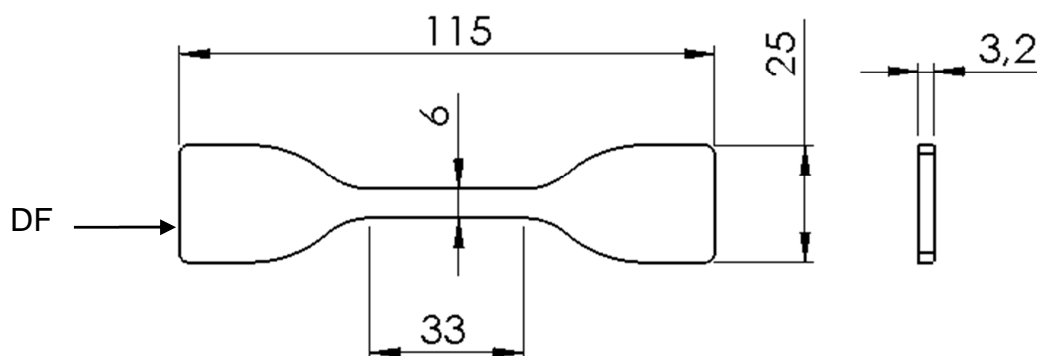


Figura 3.2 – Dimensionamento do corpo de prova segundo ASTM D-638 tipo IV, onde DF é a direção do fluxo.

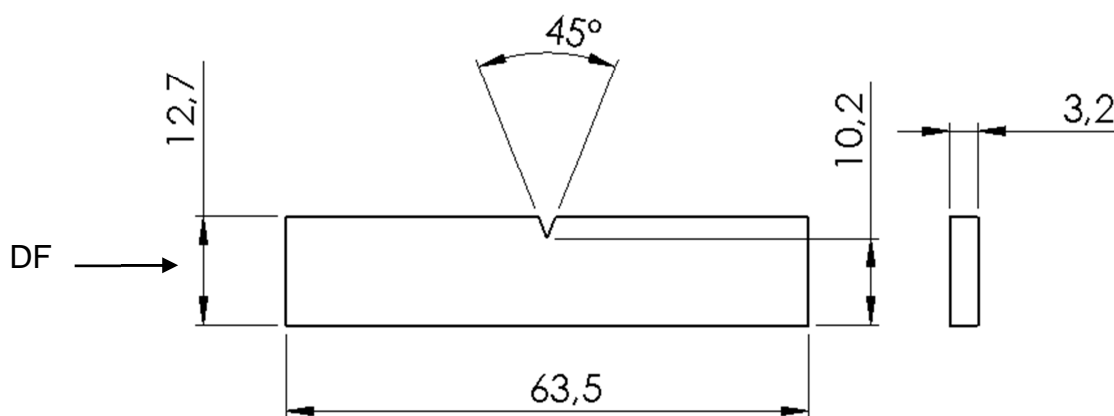


Figura 3.3 – Dimensionamento do corpo de prova segundo ASTM D-256, onde DF é a direção do fluxo.

3.3 MATERIAL PARA O MOLDE-PROTÓTIPO

Como material para o inserto das cavidades moldantes do molde-protótipo usinado optou-se por uma liga de zinco conhecida comercialmente por zamac-8. As principais propriedades do zamac-8 encontram-se na Tabela 3.2. A escolha deste material se deve ao fato, que estas ligas possuem ótima usinabilidade e o menor custo de aquisição se comparado a outros materiais empregados na fabricação de moldes-protótipo usinados (GRYZINSKI, 2011). Adicionalmente, também não se tem muitos estudos da influência deste material no moldado o que reforçaram a sua escolha.

Tabela 3.2 – Propriedades do material zamac-8.

Propriedades	Valor
Densidade a 21°C	6,3g/cm ³
Intervalo de Fusão	375° a 404°C
Resistência a Tração	374MPa
Condutibilidade Térmica	114,7W/mK
Dureza Brinell	110HB

Fonte: Adaptado de GRYZINSKI, 2011.

3.4 MATERIAL PARA O MOLDE REPRESENTATIVO DA PRODUÇÃO FINAL

Existe uma grande gama de aços utilizados na fabricação de moldes de injeção (HARADA, 2004). A condutibilidade térmica varia entre esses aços, mas de forma geral são bem próximas. Desta maneira, o material escolhido para a produção final foi o aço SAE 1045, de baixo custo e fácil aquisição. A Tabela 3.3 apresenta algumas propriedades do SAE 1045.

Tabela 3.3 - Propriedades do aço SAE 1045.

Propriedades	Valor
Densidade a 21°C	7,85g/cm ³
Intervalo de Fusão	1425-1540°C
Resistência a Tração	620MPa
Condutibilidade Térmica	45W/mK
Dureza Brinell	190HB

Fonte: Adaptado de BOHLER, 2013.

3.5 MOLDE DE INJEÇÃO EXPERIMENTAL

O porta-molde e os insertos em aço 1045 e em zamac-8 utilizados neste estudo já se encontravam prontos e pertencem ao Laboratório de Processamento de Polímeros da UTFPR. Seu projeto e fabricação foram realizados pelo NUFER, o qual utiliza o molde para pesquisa na injeção de termoplásticos em moldes-protótipo. Sua principal característica é a de permitir a intercambialidade dos insertos que compõem o molde. A Figura 3.4 mostra o porta-molde juntamente com os insertos que compõem o molde.

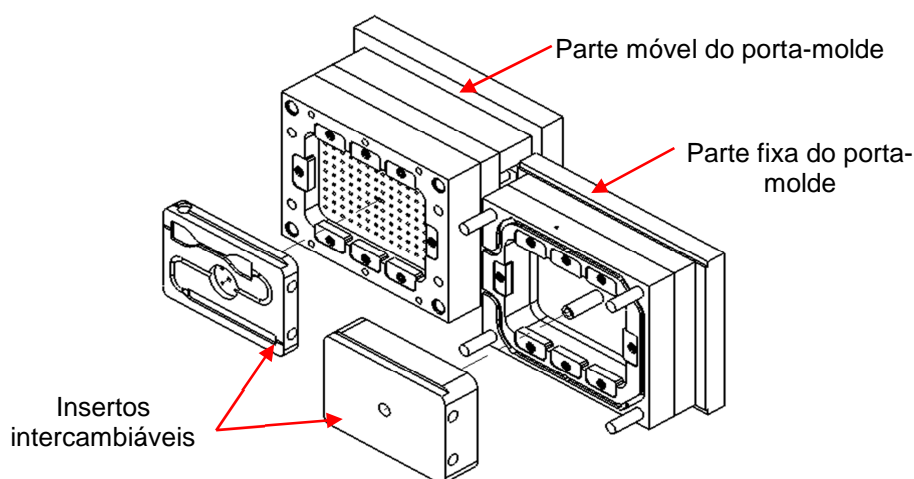


Figura 3.4 – Montagem do porta-molde e insertos intercambiáveis.

Os insertos em aço e em zamac-8 existentes permitem moldar corpos de prova de tração (ASTM D-638/03 tipo IV) e flexão (ASTM D-790/03).

Os corpos de provas podem ser obtidos de forma individual ou simultânea, através do uso de uma chave direcionadora de fluxo, conforme mostrado na Figura 3.5.

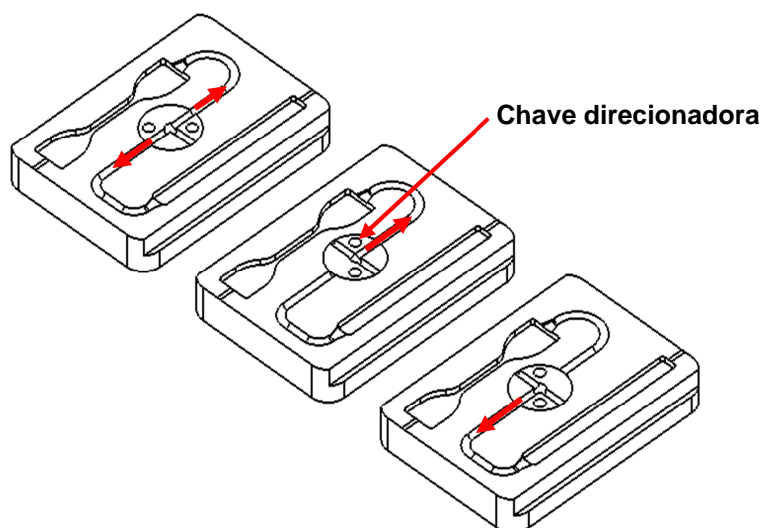


Figura 3.5 – Direção do fluxo conforme posicionamento da chave direcionadora.

Corpos de prova de flexão não são necessários para este trabalho. Porém, a partir da sua geometria é possível obter corpos de prova para o ensaio de impacto Izod, conforme a norma ASTM D-256. Para isso, é necessária apenas a redução de seu comprimento e a realização da geometria do entalhe prevista em norma.

O aquecimento e resfriamento do molde necessário para este trabalho foram feitas através de um aparelho de banho termostático da marca Micro Química modelo MQBMP-01 mostrado na Figura 3.6. Este equipamento utiliza água para o controle da temperatura, podendo resfriá-la ou aquecê-la conforme a necessidade. O aparelho conta com uma vazão de 4 litros por minuto e uma resolução de leitura de 0,1°C.



Figura 3.6 – Equipamento de banho termostático utilizado para alcançar as diferentes temperaturas do molde.

Os insertos em aço e em zamac-8 disponíveis no NUFER não possuíam um sistema de refrigeração. Para que a água proveniente do banho termostático circulasse pelo molde foi necessário o projeto e a usinagem de um circuito de água nos insertos moldantes. Ao se criar este circuito é importante que o sistema esteja bem balanceado. Segundo Menges, Michaeli e Mohren, (2000) a T_{Molde} deve ser uniforme. As diferenças de temperaturas sobre as superfícies das cavidades moldantes em um processo de produção devem estar em uma faixa máxima de 2° a 5°C (HARADA, 2004). Um circuito eficiente e balanceado reduz ou elimina possíveis tensões residuais termo-induzidas, proveniente do resfriamento desbalanceado. Para evitar diferenças de temperaturas entre as placas, o circuito foi realizado tanto nos insertos da parte fixa, como na parte móvel do molde. A geometria utilizada no

circuito foi do tipo “U”, que consiste em dois furos paralelos, cruzados por um terceiro furo, sendo este fechado por tampões de vedação como mostrado na Figura 3.7.

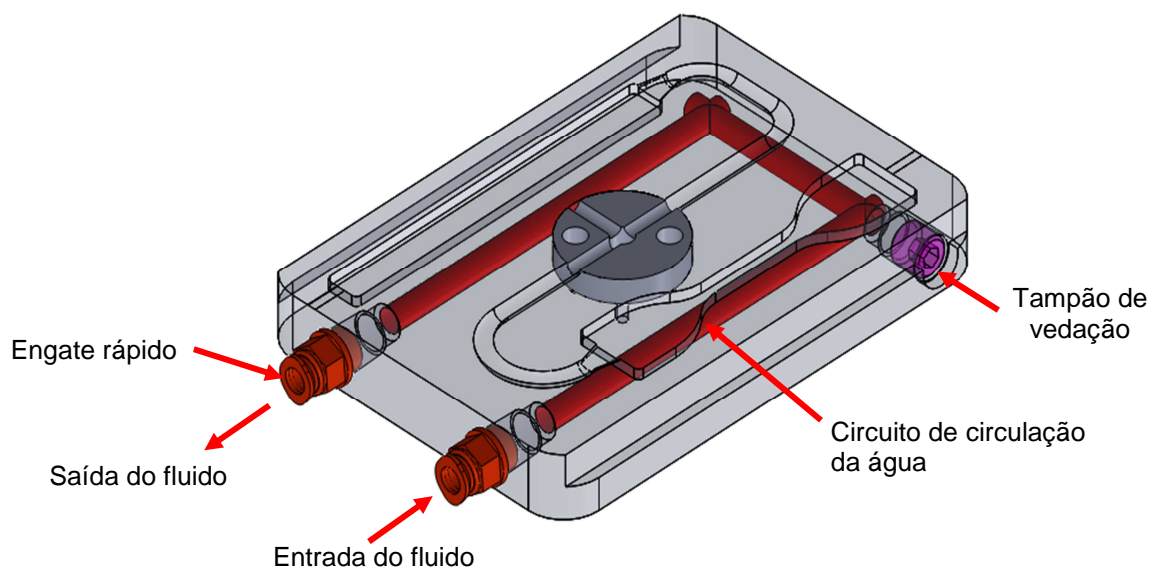


Figura 3.7 – Circuito de circulação de água na cavidade moldante.

O dimensionamento do circuito teve como preocupação a estabilidade térmica nas diferentes regiões das cavidades moldantes. A eficiência térmica do sistema não foi o foco do dimensionamento, uma vez que o molde não entrará em um regime de trabalho de produção. O dimensionamento e a localização dos furos para o circuito é ilustrada na Figura 3.8.

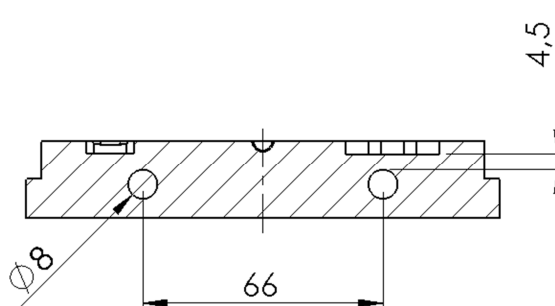


Figura 3.8 – Dimensionamento da localização dos canais de injeção.

O monitoramento da temperatura do molde (T_{Molde}) foi feito por um termopar tipo “J” com um limite de erro de leitura de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Para alojar o termopar o mais próximo possível da cavidade foi necessário furar tanto o inserto da cavidade como

a placa porta cavidade. O termopar ficou posicionado a 14,50mm da cavidade. A Figura 3.9 mostra a localização do alojamento do termopar no molde.

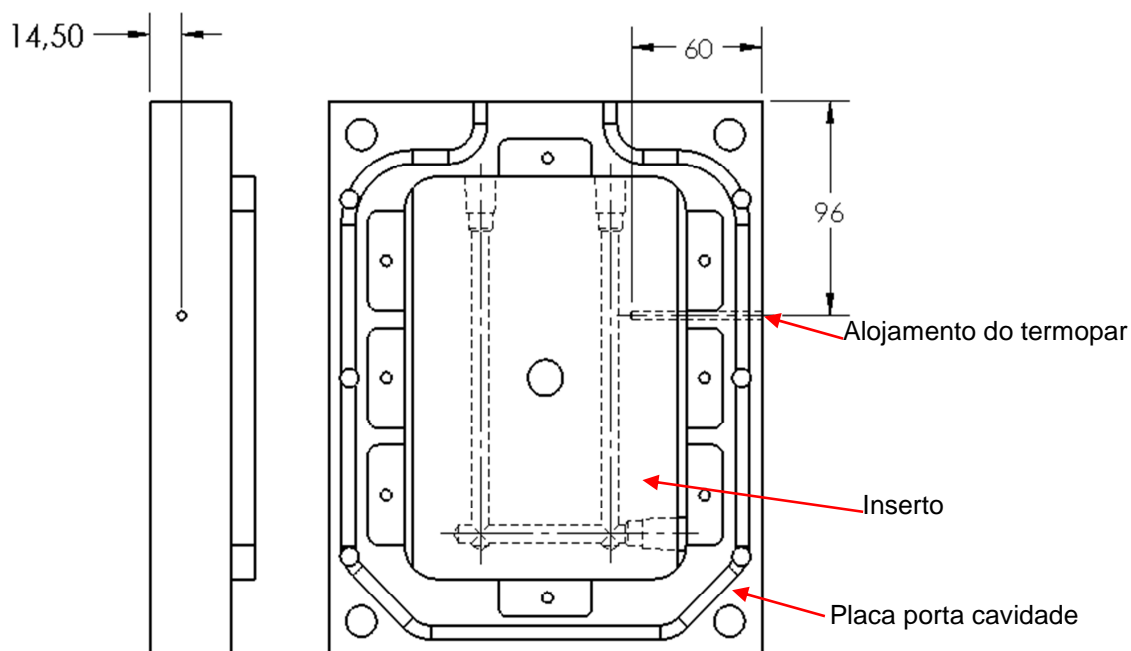


Figura 3.9 – Localização do alojamento do termopar.

3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA A MOLDAGEM POR INJEÇÃO

Para uma melhor compreensão do planejamento experimental ressalta-se que o ensaio de injeção possuiu duas fases distintas: a primeira foi a obtenção de um moldado representativo da produção final injetada em um molde em aço; a segunda a obtenção de amostras que foram injetadas em molde-protótipo em zamac-8 com diferentes temperaturas de molde e de fundido. Espera-se que, através da variação destas temperaturas, obtenham-se amostras com diferentes propriedades mecânicas que serão então comparadas ao moldado representativo da produção final.

Os ensaios de injeção foram realizados no laboratório de Processamento de Polímeros do NUFER da UTFPR. A injetora utilizada foi a Haitian HTF-58X com força de fechamento de 58 toneladas e capacidade de injeção de 80 gramas do material poliestireno.

As amostras foram codificadas conforme ilustrado na Figura 3.10. O objetivo desta codificação é a de facilitar a identificação e a citação destas amostras nos resultados dos experimentos.

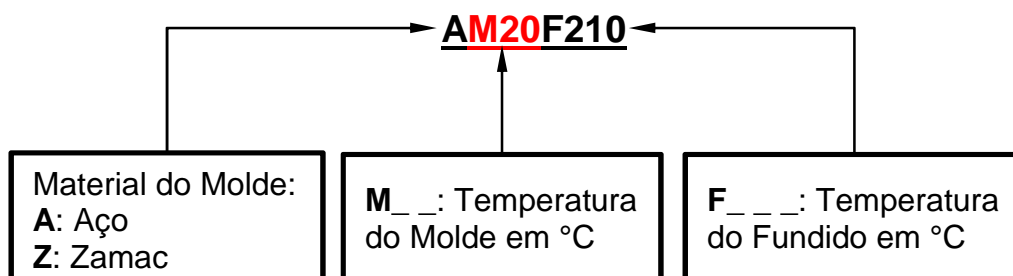


Figura 3.10 – Codificação das amostras.

3.6.1 Obtenção do Moldado Representativo da Produção Final

Com o objetivo de obter-se um moldado representativo da produção final foi necessário conhecer quais são os parâmetros de temperaturas de molde e de fundido utilizadas pelas empresas na injeção do PP copolímero. Foram selecionadas ao acaso, vinte empresas de injeção, as quais possuíam sites na internet. A primeira abordagem ocorreu através da área de contatos, ou correio eletrônico disponíveis no site de cada empresa. Das vinte empresas consultadas, cinco retornaram este primeiro contato feito e colaboraram com este trabalho. Os valores de T_{Molde} e de T_{Fund} utilizados por estas empresas encontra-se na Tabela 3.4. O formulário utilizado na pesquisa se encontra no Apêndice A, localizado no final deste trabalho. A empresa “A” localiza-se em Santo Amaro – São Paulo; a “B” em Ribeirão Preto – São Paulo; a “C” em São Paulo – São Paulo; a “D” em Curitiba – Paraná e a “E” em Massaranduba – Santa Catarina. A empresa “A” utiliza água gelada na refrigeração de seus moldes. As demais empresas utilizam água apenas resfriada. A temperatura média do molde utilizada pelas empresas foi de 19,8°C. Optou-se então, em arredondar este valor e utilizar como temperatura média do molde de produção 20°C.

O número de pontos de controle, também conhecido como escalonamento das temperaturas, depende da configuração da injetora, sendo que na maioria dos casos, varia entre três e cinco pontos (MENGES, MICHAELI e MOHREN, 2000). Para efeito da T_{Fund} é considerado o ponto de controle mais próximo ao bico de injeção, que corresponde na Tabela 3.4 à primeira temperatura da esquerda. Nesta

região a temperatura média foi de 209°C sendo que este valor médio foi então arredondado para 210°C.

Tabela 3.4 – Parâmetros de temperatura de molde e de fundido utilizados pelas empresas na injeção do PP copolímero.

Empresa	Temperatura Molde (°C)	Escalonamento da Temperatura do Canhão (°C)
A	15	195°C - 195°C - 190°C - 180°C
B	23	215°C - 210°C - 205°C - 200°C - 195°C
C	20	210°C - 205°C - 200°C - 190°C
D	21	220°C - 215°C - 205°C - 195°C
E	20	205°C - 195°C - 190°C - 185°C - 180°C

As pressões, velocidades e os tempos que foram obtidos através da técnica “short shot” onde os parâmetros são aumentados de forma gradual (Barry *et al.*,1995).

A Tabela 3.5 mostra os principais parâmetros de temperatura e pressão utilizados para a obtenção do moldado representativo da produção final injetado em molde de aço. O tempo de recalque e resfriamento utilizado foi de 15 e 10 segundos respectivamente. Foram obtidos trinta corpos de prova no molde em aço utilizando estes parâmetros.

Tabela 3.5 – Parâmetros de injeção utilizados na obtenção do moldado obtido no molde em aço.

Codificação	Temperatura Molde (°C)	Temperatura Fundido (°C)	Pressão Injeção (MPa)	Velocidade de Injeção mm/s	Pressão de recalque (MPa)
AM20F210	20	210	33	20	25

3.6.2 Obtenção das Amostras no Molde em Zamac-8

No estudo bibliográfico identificou-se a importância da T_{Molde} e da T_{Fund} nas propriedades mecânicas das peças injetadas. Desta maneira, estas temperaturas foram escolhidas como foco deste estudo e tiveram seus valores variados durante a obtenção dos moldados no molde-protótipo em zamac-8. Todos os outros parâmetros foram mantidos os mesmos que utilizados anteriormente na seção 3.6.1

para a obtenção do moldado injetado no molde em aço. Foram utilizados três níveis de T_{Molde} , com um incremento de 20°C entre eles. A T_{Fund} também teve três níveis, com uma variação de 15°C entre as temperaturas. A utilização destes dois parâmetros com três níveis cada um resultaram em um fatorial completo 3^2 , totalizando nove tratamentos. Os parâmetros utilizados na obtenção das amostras no molde-protótipo em zamac-8 são mostrados na Tabela 3.6. Para cada um dos parâmetros foram obtidas trinta corpos de prova.

Tabela 3.6 - Parâmetros utilizados na obtenção dos corpos de prova obtidos no molde-protótipo em zamac-8.

Codificação	Temperatura Molde (°C)	Temperatura Fundido (°C)	Pressão Injeção (MPa)	Velocidade de Injeção mm/s	Pressão de recalque (MPa)
ZM20 F210	20	210	33	20	25
ZM20 F225	20	225	33	20	25
ZM20 F240	20	240	33	20	25
ZM40 F210	40	210	33	20	25
ZM40 F225	40	225	33	20	25
ZM40 F240	40	240	33	20	25
ZM60 F210	60	210	33	20	25
ZM60 F225	60	225	33	20	25
ZM60 F240	60	240	33	20	25

3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS AMOSTRAS

A caracterização mecânica das amostras se deu através dos ensaios de tração e de impacto. Segundo Mano e Mendes (2004), estes são os ensaios mais importantes na caracterização mecânica dos polímeros. O objetivo foi medir a resistência à tração e ao impacto das amostras e compará-las ao moldado representativo da produção final injetado no molde em aço. Também foi realizada uma análise para verificar a existência de correlação entre as propriedades de tração e impacto com o percentual de cristalinidade.

3.7.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de Ensaio Destrutivos da UTFPR. O equipamento utilizado foi da marca EMIC, modelo DL-10000. O método do ensaio e a geometria do corpo de prova seguem a norma ASTM D-638 tipo IV. A velocidade de deslocamento utilizada foi 5mm/min. Os dados de força foram mensurados por uma célula de carga de 5kN de capacidade máxima. Foram utilizados cinco corpos de prova escolhidas ao acaso para cada um dos tratamentos de temperaturas utilizados.

3.7.2 Impacto Izod

Para o ensaio de impacto Izod foram utilizados os recursos do departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O aparelho utilizado para o ensaio foi da marca Ceast modelo Resil 5.5 ilustrado na Figura 3.11, com pêndulo de 2,75J.



Figura 3.11 – Aparelho Ceast resil 5.5 utilizado para ensaio de impacto Izod.

A norma utilizada para a realização do ensaio foi a ASTM D-256. Foram utilizados cinco corpos de prova escolhidos ao acaso para cada um dos tratamentos

de temperaturas utilizados. O entalhe e o ensaio de impacto foram realizados a uma temperatura de 18°C, sendo que a umidade do ambiente não foi controlada. Após a criação do entalhe, os corpos de prova ficaram em repouso por 24 horas antes de serem submetidos ao ensaio de impacto. O raio do utilizado no fundo do entalhe foi 0,25mm, conforme previsto na norma.

3.8 DETERMINAÇÃO DA CRISTALINIDADE

A determinação da cristalinidade se deu através do ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC). O objetivo é de identificar se existe relação entre a cristalinidade das amostras com as suas propriedades mecânicas.

O ensaio de DSC ocorreu na Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), Câmpus Medianeira, no laboratório de análises térmicas e espectrométricas de materiais e combustíveis (LATECOM) do departamento de Química. O aparelho utilizado foi da marca PerkinElmer modelo STA 6000, mostrado na Figura 3.12.

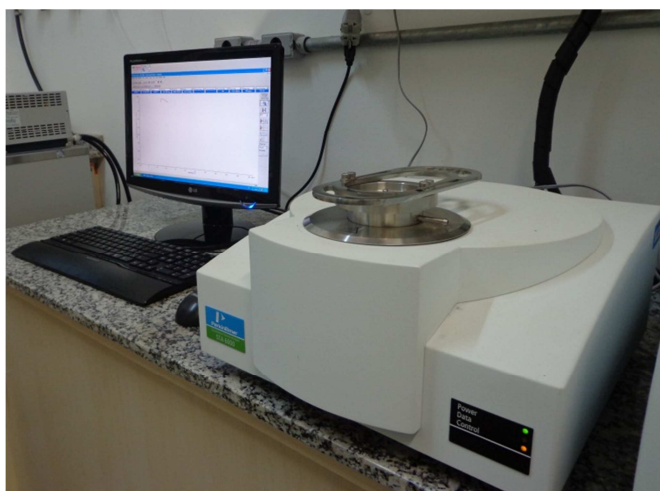


Figura 3.12 – DSC marca PerkinElmer modelo STA 6000.

Com o objetivo de preservar o histórico termodinâmico das amostras, foi realizada apenas uma corrida de aquecimento, sendo os dados registrados a partir de 50°C até a temperatura de 210°C, na qual foi determinado o calor de fusão da amostra ($\Delta H_{amostra}$), o qual se relaciona com a cristalinidade.

As amostras analisadas foram extraídas da região central do corpo de prova de flexão conforme ilustrado na Figura 3.13.

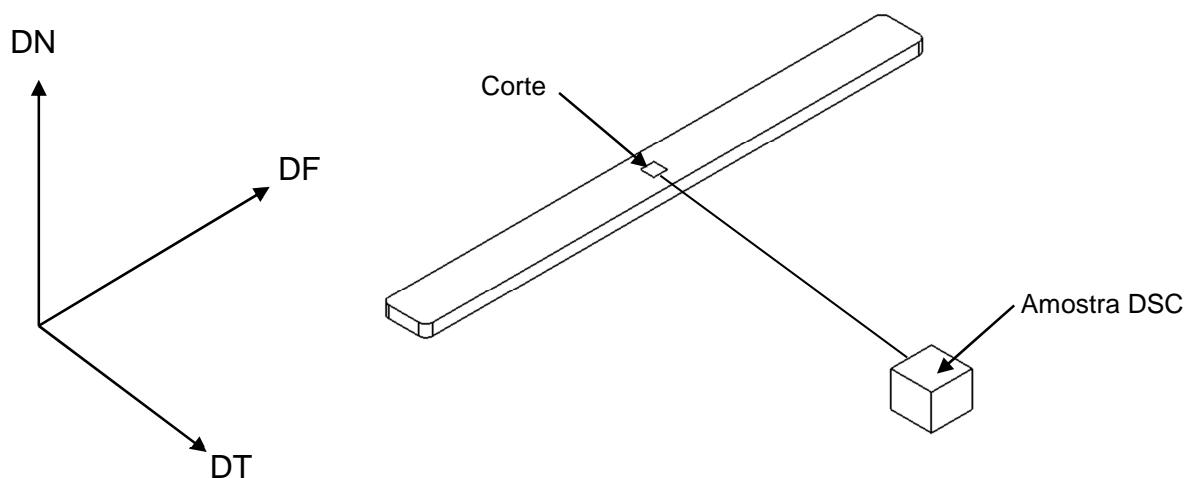


Figura 3.13 – Região onde foi determinada a cristalinidade por DSC, onde DF, direção do fluxo; DT, direção transversal; DN, direção normal ao plano DF – DT.

As amostras com cerca de 8mg, foram pesadas em uma balança analítica da marca Marte modelo AW220, com sensibilidade de 0,1mg. Após a pesagem, as mesmas foram acondicionadas em cápsulas de alumínio e prensadas. Durante o ensaio, as cápsulas foram aquecidas a uma taxa constante de 10°C/min, sob uma atmosfera de nitrogênio com fluxo de cerca de 20ml/min. O percentual de cristalinidade ($\chi_c\%$) da amostra foi calculado através de uma regra de três simples, conforme Equação (1) (HARRIS *et al.*, 2004). O calor de fusão da amostra ($\Delta H_{amostra}$) é então dividido pelo calor de fusão teórico do PP % cristalino ($\Delta H_{100\%}$), o qual segundo Netzsch (2014) é cerca de 207J/g.

$$\chi_c\% = \frac{\Delta H_{amostra}}{\Delta h_{100\%}} \times 100\% \quad \text{Equação (1)}$$

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados coletados durante os experimentos passaram por tratamentos estatísticos. A análise da variância (ANOVA - *Analysis of variance*) foi utilizada com o objetivo de obter informações mais precisas sobre as médias dos resultados

(MONTGOMERY, 2004). Modelos de regressão foram criados com os resultados das propriedades dos moldados obtidos nas diferentes temperaturas para o zamac-8. O método dos mínimos quadrados utilizado para a regressão procura o melhor ajuste para um conjunto de dados, tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (COSTA NETO, 1977). Através da regressão é obtida uma função na qual é possível prever resultados ou otimizar os parâmetros para que determinado resultado seja alcançado. O objetivo é utilizar a regressão para otimizar a T_{Molde} e a T_{Fund} visando obter protótipos funcionais com as propriedades mecânicas mais próximas possíveis ao moldado representativo da produção final. O programa utilizado para os tratamentos estatístico dos dados foi o Minitab 17, da empresa Minitab Inc.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios da calorimetria exploratória diferencial (DSC), do ensaio de tração e do ensaio de impacto. Através do tratamento estatístico e com base na literatura discute-se a influência do material zamac-8 nas propriedades do moldado. Também foi analisada a influência da temperatura do molde (T_{Molde}) e da temperatura do fundido (T_{Fund}) sobre a cristalinidade e sobre as propriedades de tração e impacto. Um modelo de regressão foi proposto onde através da variação da T_{Molde} e da T_{Fund} é possível prever um valor condicional para as propriedades que foram foco da regressão.

4.1 INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A injeção dos corpos prova, de forma geral, transcorreram normalmente. O único problema ocorreu na obtenção dos primeiros corpos de prova moldados. Os corpos de prova de tração, moldados no molde-protótipo em zamac-8 e no molde em aço, apresentavam vazios no centro da sua geometria. Este defeito surgia durante a fase de resfriamento da peça, tendo como provável causa, a falta de compactação do material. Ao retirar a peça ainda quente do molde era possível ver o surgimento dos vazios. A medida inicial utilizada para que o problema fosse solucionado foi o aumento da pressão de injeção e de recalque. Porém, o material extra que entrava na cavidade através do aumento das pressões, tinha como único efeito o surgimento de rebarbas do moldado. A força de fechamento do molde foi aumentada gradativamente até que atingisse o seu valor máximo, porém os problemas dos vazios e das rebarbas persistiam conforme mostrado na Figura 4.1.

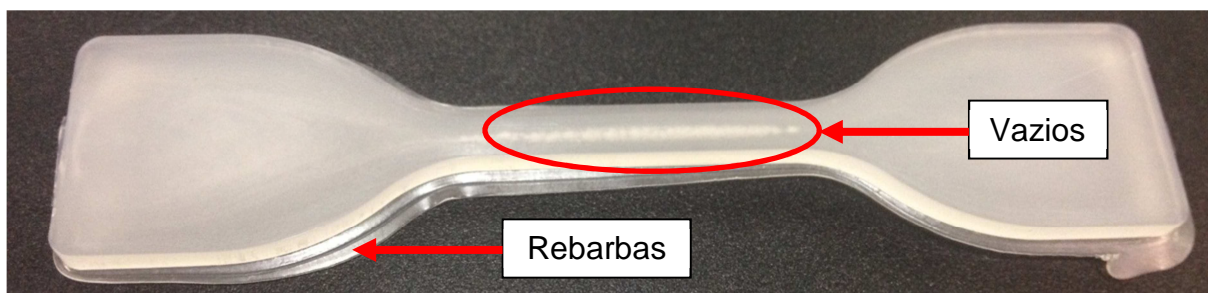


Figura 4.1 – Problemas de vazios e rebarbas nas amostras injetadas em PP.

Depois de várias tentativas no ajuste dos parâmetros, resolveu-se verificar a existência de folgas nas faces de fechamento do molde. Mesmo não apresentando folgas entre as faces, resolveu-se alterar curso do fechamento do molde em 0,2mm. Com o maior travamento do molde o problema foi resolvido. As pressões de injeção e de recalque puderam ser aumentadas o que resultou em uma maior compactação do material, eliminando as rebarbas e o problema da formação dos vazios. Estas pressões bem como os demais parâmetros de injeção utilizados estão apresentados nas Tabelas 3.5 e 3.6 do capítulo 3. A Figura 4.2 mostra o corpo de prova após a alteração do curso do molde.



Figura 4.2 – Corpo de prova de PP obtido após alteração do curso de fechamento e aumento das pressões de injeção e recalque.

Os primeiros corpos de provas obtidos em cada uma das temperaturas programadas foram descartados. Esta medida se tornou necessária, pois era preciso aguardar para que a temperatura desejada do molde ou do fundido fosse atingida. Durante este tempo, o material já dosado, permanecia no canhão da máquina, podendo levá-lo à degradação e assim a eventuais diferenças nas análises posteriores.

4.2 RESULTADOS DA CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

Para a determinação do percentual de cristalinidade ($\chi_c\%$) pela calorimetria exploratória diferencial (DSC), inicialmente não estavam planejadas réplicas. Após realizar os primeiros ensaios notou-se que os valores das cristalinidades dos moldados obtidos nas diferentes faixas de temperatura estavam muito próximos uns dos outros. Decidiu-se então usar três réplicas com o objetivo de analisar as médias

dos resultados. A Tabela 4.1 demonstra o resultado da cristalinidade média para os moldados injetados no molde em aço e em zamac-8.

Tabela 4.1 – Resultado do percentual de cristalinidade ($\chi_c\%$) médio dos corpos de prova em PP.

Molde	Codificação	Entalpia (J/g)	Cristalinidade ($\chi_c\%$)
Aço	AM20F210	65,16 ± 1,352	31,48 ± 0,653
	ZM20F210	66,88 ± 1,984	32,31 ± 0,958
	ZM20F225	68,43 ± 3,912	33,06 ± 1,890
	ZM20F240	67,39 ± 3,294	32,56 ± 1,591
	ZM40F210	65,49 ± 3,096	31,64 ± 1,496
Zamac	ZM40F225	65,91 ± 2,313	31,84 ± 1,117
	ZM40F240	68,94 ± 3,623	33,30 ± 1,750
	ZM60F210	67,27 ± 1,854	32,50 ± 0,896
	ZM60F225	67,09 ± 1,123	32,41 ± 0,543
	ZM60F240	66,68 ± 3,419	32,21 ± 1,651

4.2.1 Influência do Material do Molde sobre a Cristalinidade do Moldado

A Figura 4.3 ilustra a comparação entre os valores das cristalinidades ($\chi_c\%$) obtidas para o moldado representativo da produção final, injetado em molde de aço (AM20F210) e dos moldados injetados em molde de zamac-8 (ZM20F210).

Com o objetivo de analisar somente a influência do material zamac-8 sobre a cristalinidade do moldado, todos os parâmetros de injeção foram mantidos iguais, tanto no molde em zamac-8 como em aço.

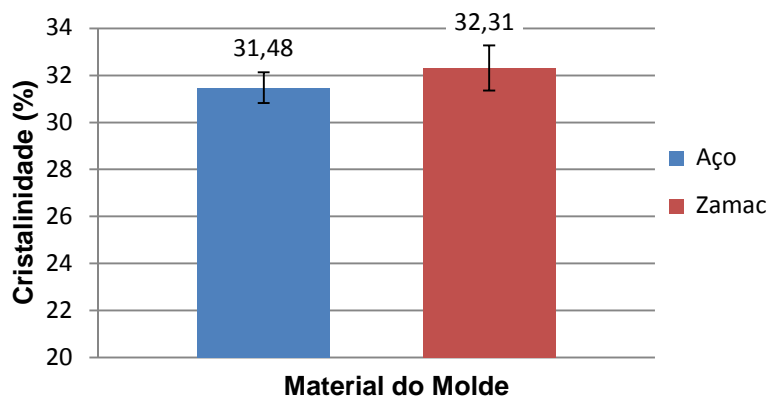


Figura 4.3 – Gráfico comparativo da cristalinidade para o moldado de PP em zamac-8 (ZM20F210) e em aço (AM20F210).

A Figura 4.4 mostra o gráfico comparativo das entalpias dos moldados obtidos com os mesmos parâmetros de injeção para o molde em aço (AM20F210) e em zamac-8 (ZM20F210). Cada uma das curvas é a representação da entalpia média dos três corpos de prova ensaios. Os gráficos foram obtidos através dos dados gerados no ensaio de DSC, os quais sofreram ajustes na linha de base.

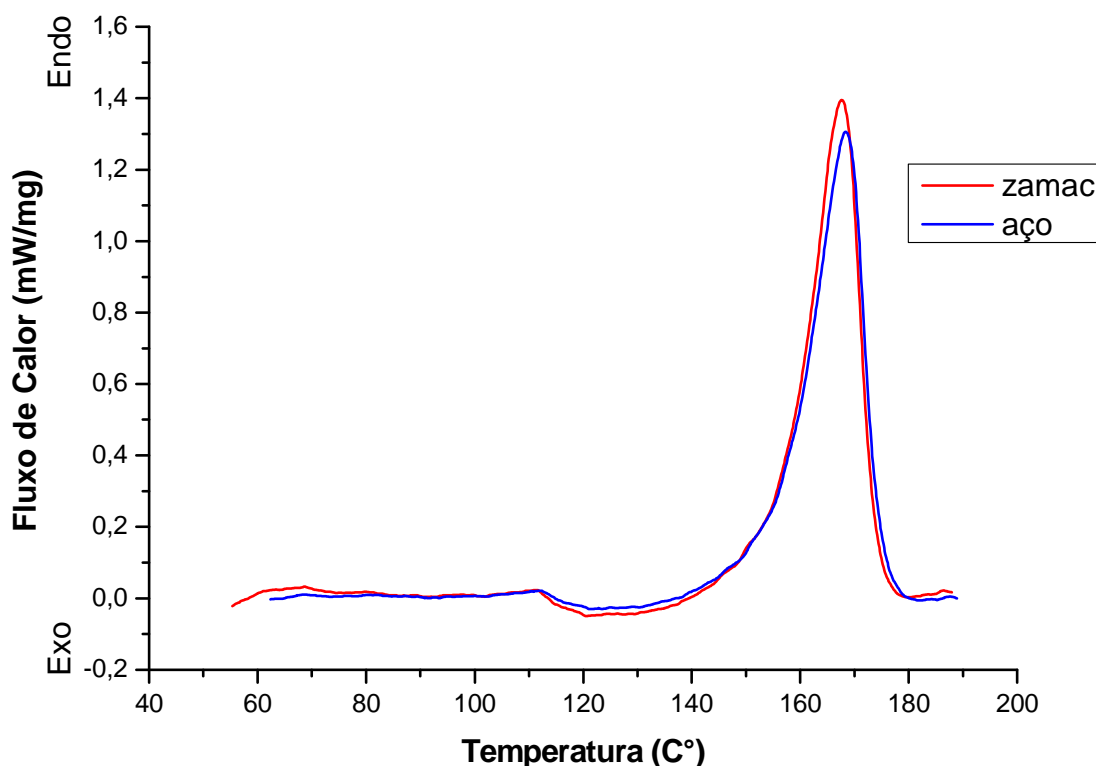


Figura 4.4 – Gráfico comparativo das entalpias para o moldado de PP obtido no molde em zamac-8 e em aço com os mesmos parâmetros de injeção.

O resultado demonstrou que o valor da cristalinidade para o moldado em zamac-8 foi ligeiramente superior ao encontrado no molde em aço. Porém, ao se comparar as médias das cristalinidades através da análise da variância, se observa através da Tabela 4.2, que as médias são estatisticamente iguais por apresentar um *P* valor maior que 0,05 (MONTGOMERY, 2004).

A maior condutividade térmica do molde em zamac-8 deveria implicar em uma maior transferência de calor entre o moldado e o material do molde, tendo assim, efeitos na cinética de cristalização resultando em uma menor cristalinidade (MATEUS *et al.*, 2007 e SILVA *et al.*, 2007). Assim, para o moldado injetado em zamac-8 era esperado um menor valor de cristalinidade.

Tabela 4.2 – ANOVA para cristalinidade dos corpos de prova obtidos no molde-protótipo em zamac-8 e no molde em aço.

Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Cristalinidade	1	1,043	1,043	1,550	0,281
Resíduos	4	2,690	0,673		
Total	5	3,733			

Onde: G.L significa graus de liberdade; SQ é a soma dos quadrados; QM é a média quadrada; F Est. é teste de significância e o P valor é o nível de significância.

Bareta (2007) também teve resultados muito próximos de cristalinidade comparando os moldados injetados em um molde em aço e em zamac-5. O autor, porém, não cita qual o desvio padrão, o que impossibilita termos informações mais seguras se as médias são estatisticamente iguais o que reforçaria os resultados obtidos neste estudo.

4.2.2 Efeito da Temperatura do Molde e do Fundido sobre a Cristalinidade do Moldado Obtido em Zamac-8

As médias das cristalinidades obtidas nas diferentes temperaturas de molde e de fundido indicada na Tabela 4.1, foram comparadas através da análise da variância. O P valor acima de 0,05 que aparece na Tabela 4.3, demonstra que todas as cristalinidades obtidas possuem as médias estatisticamente iguais. Também é possível observar que não existe interação entre a T_{Molde} e a T_{Fund} pelo P valor ser acima de 0,05.

Tabela 4.3 – ANOVA para cristalinidade em função da temperatura do molde e do fundido.

Propriedades	Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Cristalinidade	Temperatura Molde	2	0,694	0,347	0,180	0,837
	Temperatura Fundido	2	1,323	0,661	0,340	0,715
	Interação	4	4,642	1,161	0,600	0,667
	Resíduos	18	34,790	1,933		
	Total	26	41,449			

O aumento da T_{Molde} ou da T_{Fund} , segundo Viana (2004), faz com que o material aumente o tempo para alcançar a temperatura de cristalização e como consequência um maior valor de cristalinidade é alcançado. Neste estudo tal

afirmativa não pode ser observada, sendo que estatisticamente as médias das cristalinidades foram iguais.

Bareta (2007) também não conseguiu variações expressivas de cristalinidade ao variar a T_{Molde} em zamac entre 30 e 70°C, sendo que a diferença de cristalinidade ficou abaixo de 1% para este intervalo temperatura.

O gráfico de efeitos na Figura 4.5 mostra apenas uma tendência, uma vez que todas as médias são estatisticamente iguais. A cristalinidade mostra uma tendência de aumento com o aumento da T_{Fund} , sendo que o efeito da T_{Molde} parece não seguir um padrão lógico. Esta menor influência da T_{Molde} em relação a T_{Fund} pode estar ligada a afirmação de Viana (2004) em que a T_{Molde} , por ter o efeito compensatório da pele, possui menor influência sobre a cristalinidade do moldado.

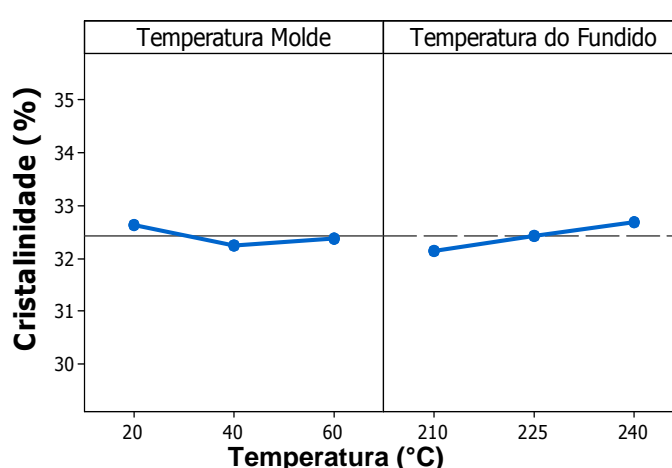


Figura 4.5 – Gráfico de efeitos da temperatura do molde e do fundido na cristalinidade do moldado.

Os resultados das cristalinidades obtidas por DSC neste estudo representam uma média das diferentes camadas que compõem o moldado. A amostra, como ilustrado na Figura 3.12 do Capítulo 3, foi retirada da região central, sendo que esta engloba a espessura total do corpo de prova. Desta forma, as médias estatisticamente iguais, obtida neste estudo, não implicam em afirmar que esta cristalinidade esteja dispersa de maneira homogênea no polímero ou que morfologicamente os moldados sejam iguais. Assim como afirmado por Azeredo (2010), a cristalização ocorre da parede para o centro da espessura do produto injetado, formando-se ao longo da espessura várias camadas com cristalinidade variável. A elevada troca térmica entre o moldado e a parede do molde faz com que

a região mais externa atinja a temperatura de cristalização em menor tempo. Desta maneira, a pele é a que possui a menor cristalinidade entre todas as diferentes camadas do moldado (MENDOZA *et al.*, 2003). A pele, por ser a primeira região a esfriar, cria uma barreira de isolamento, devido à baixa condutividade térmica do polímero, conduzindo a uma taxa mais lenta de resfriamento do núcleo, e consequentemente, a uma maior cristalinidade nesta região (VIANA, 2004). Assim, ao variarmos os parâmetros de temperaturas, a existência da pele pode ter tido um efeito compensatório sobre a cristalinidade média. O uso de parâmetros de temperaturas mais baixo resultaria em um moldado com uma pele com menor cristalinidade e maior espessura, sendo o núcleo mais cristalino. Já com temperaturas mais altas o resultado seria uma pele com maior cristalinidade e menor espessura, o que levaria a um resfriamento mais rápido do núcleo, tornando-o menos cristalino.

Outro fator que pode ter influenciado a obtenção das mesmas cristalinidades nos diferentes parâmetros de temperaturas, é o tipo do polímero utilizado. O polipropileno copolímero heterofásico apresenta um processo de cristalização diferenciado quando comparado aos homopolímeros que são facilmente cristalizáveis. Para o PP heterofásico, a presença do etileno, além de gerar material amorfo pode impedir significativamente a cristalização como explanado por Ojeda (1996). Este fato aliado ao pequeno intervalo na T_{Molde} utilizado e somado ao efeito compensatório da pele citado por Viana (2004), pode ter contribuído para o resultado das cristalinidades encontradas fossem iguais.

4.2.3 Regressão para a Cristalinidade

A ANOVA vista anteriormente na Tabela 4.3 mostrou que todas as médias de cristalinidade obtidas nas diferentes temperaturas são estatisticamente iguais. Com isto, torna-se desnecessário e inviável a utilização de um modelo de regressão.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os resultados obtidos no ensaio de tração para os moldados obtidos no molde em aço e em zamac são apresentados na Tabela 4.4. Para determinação do módulo de elasticidade não foi utilizado extensímetro, o que forneceria um valor mais confiável nos resultados. Possíveis deslizamentos das garras implicariam em deformação sem aumentos consideráveis de força, e que seriam visíveis através dos gráficos, porém, este fato não foi observado em nenhuma das amostras ensaiadas.

Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de tração do corpo de prova em PP.

Material do molde	Codificação	Tensão Máxima (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Aço	AM20F210	27,31 ± 0,302	20,79 ± 0,259	504,5 ± 11,648
	ZM20F210	27,10 ± 0,263	21,01 ± 0,301	499,33 ± 20,003
	ZM20F225	27,06 ± 0,281	20,89 ± 0,472	500,62 ± 11,839
	ZM20F240	27,27 ± 0,104	21,16 ± 0,142	500,49 ± 6,658
	ZM40F210	27,52 ± 0,208	21,25 ± 0,208	519,60 ± 5,331
Zamac-8	ZM40F225	27,38 ± 0,131	21,05 ± 0,129	517,02 ± 5,784
	ZM40F240	27,12 ± 0,121	20,86 ± 0,152	512,37 ± 4,800
	ZM60F210	27,58 ± 0,091	21,25 ± 0,070	526,14 ± 4,344
	ZM60F225	27,67 ± 0,200	21,37 ± 0,163	535,73 ± 4,572
	ZM60F240	27,39 ± 0,155	21,17 ± 0,226	528,34 ± 7,780

4.3.1 Influência do Material do Molde em Zamac-8 sobre as Propriedades de Tração

A Figura 4.6 mostra o comparativo entre as propriedades de tração dos moldados injetados nos diferentes materiais de molde. Todos parâmetros de injeção foram mantidos os mesmos na obtenção dos moldados, seja para o molde em aço (AM20F210) como para o molde em zamac-8 (ZM20F210).

No ensaio de tração era esperada segundo a literatura uma influência mais significativa do zamac-8 sobre o moldado. A literatura cita uma diminuição na resistência a tração (tensão máxima) para os moldados obtidos nos moldes em zamac quando comparados com aos moldados injetados em molde de aço. Gryzinski (2011) obteve uma redução de 8%, já para Baretta *et al.* (2006) esta redução foi de 6%.

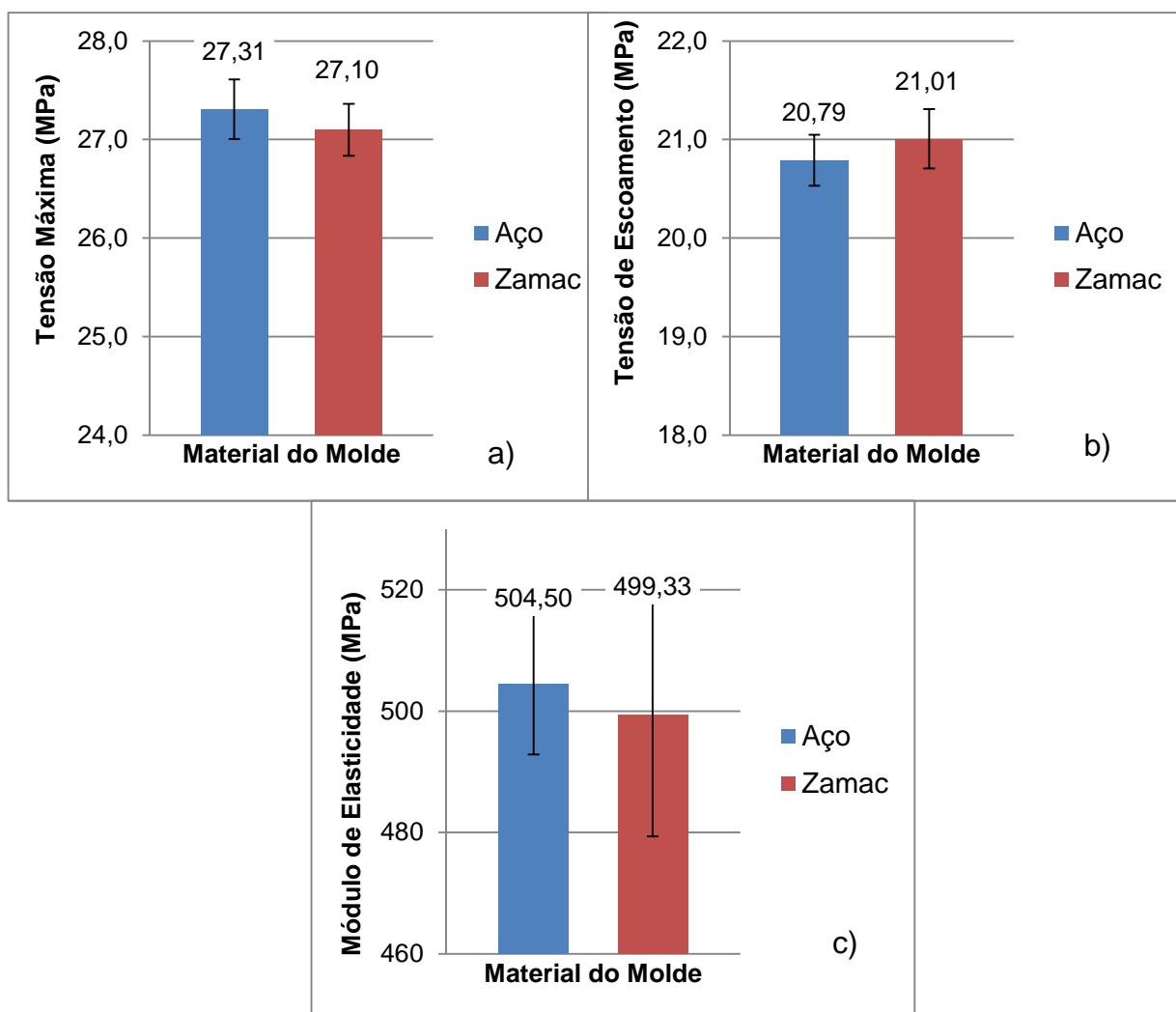


Figura 4.6 – Gráfico comparativo para o moldado obtido no molde em zamac-8 e em aço: a) Tensão Máxima; b) Tensão de Escoamento; c) Módulo de Elasticidade.

Foi utilizado a ANOVA para verificar se as diferenças encontradas nas comparações das propriedades de tração eram significativas, Tabela 4.5. Através dos valores de P valor acima de 0,05, apresentados no campo P , pode-se afirmar que as médias de tensão máxima, tensão de escoamento e módulo de elasticidade injetadas em aço são estatisticamente iguais quando comparadas com as injetadas em zamac. Este resultado demonstra que para os mesmos parâmetros de injeção, a influência do zamac-8 sobre as propriedades de tração do moldado não é estatisticamente significativa. Desta maneira, é possível obter um protótipo funcional em um molde-protótipo em zamac-8 com características mecânicas de tração estatisticamente iguais as obtidas em um molde em aço.

Tabela 4.5 – ANOVA para as propriedades de tração dos corpos de prova de PP obtidos no molde-protótipo em zamac-8 e no molde em aço.

Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Tensão Máxima	1	0,108	0,108	1,350	0,280
Resíduos	8	0,643	0,080		
Total	9	0,751			
Tensão Escoamento	1	0,119	0,119	1,510	0,255
Resíduos	8	0,631	0,079		
Total	9	0,750			
Módulo de Elasticidade	1	66,980	66,980	0,250	0,631
Resíduos	8	2143,180	267,900		
Total	9	2210,160			

A Figura 4.7 mostra através do gráfico tensão – deformação, a comparação entre os moldados obtidos no molde em aço (AM20F210) e em zamac-8 (ZM20F210), obtidos com os mesmos parâmetros de injeção. Cada curva representada corresponde à média obtida a partir dos cinco corpos de prova ensaiados. Dentro da fase elástica os moldados em aço e em zamac se comportam de maneira similar. No regime de escoamento, porém, existe uma diferença na tensão para um mesmo grau de deformação, o que pode sugerir que exista alguma diferença morfológica entre eles.

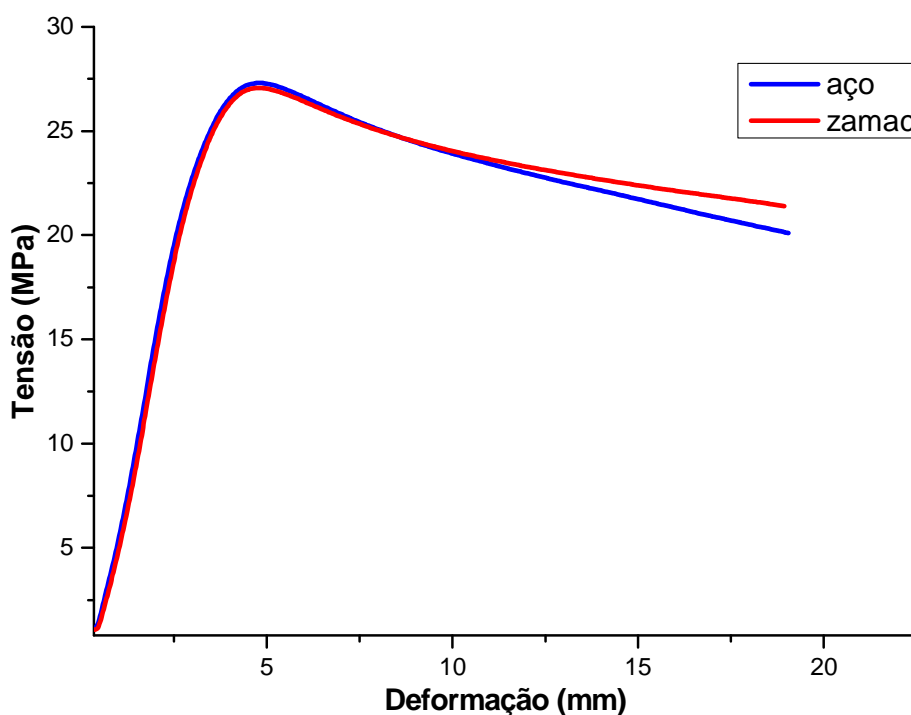


Figura 4.7 – Gráfico tensão – deformação para os moldados de PP obtidos no molde em zamac-8 e em aço com os mesmos parâmetros de injeção.

4.3.2 Efeito da Temperatura do Molde e do Fundido nas Propriedades de Tração do Moldado Obtido em Zamac-8

Os resultados dos ensaios de tração, obtidos com os diferentes parâmetros de temperatura de molde e de fundido no molde em zamac-8, foram submetidos à ANOVA. Os valores apresentados na Tabela 4.6, com um P valor menor que 0,05 para o fator, indicam que pelo menos uma das médias são diferentes, sendo possível, desta forma, afirmar com 95% de certeza que as diferenças amostrais dessa propriedade devem-se a mudanças deste fator, e que não ocorreram ao acaso. O P valor abaixo de 0,05 para interação indica que há influência de um fator sobre o outro em pelo menos um dos níveis utilizados (MONTGOMERY, 2004).

A T_{Molde} mostra ter influência em todas as propriedades de tração, já a T_{Fund} não apresentou influência estatisticamente significativa. Para a tensão máxima houve interação significativa entre a T_{Fund} com a T_{Molde} , sendo que para análise desta propriedade a T_{Fund} não deve ser excluída do modelo.

Tabela 4.6 – ANOVA para as propriedades de tração em função da temperatura do molde e do fundido.

Propriedades	Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Tensão Máxima	Temperatura Molde	2	1,220	0,610	17,930	0,000
	Temperatura Fundido	2	0,163	0,082	2,390	0,106
	Interação	4	0,564	0,141	4,140	0,007
	Resíduos	36	1,225	0,034		
	Total	44	3,173			
Tensão Escoamento	Temperatura Molde	2	0,512	0,256	4,620	0,016
	Temperatura Fundido	2	0,080	0,040	0,720	0,493
	Interação	4	0,580	0,145	2,620	0,051
	Resíduos	36	1,997	0,055		
	Total	44	3,170			
Módulo de Elasticidade	Temperatura Molde	2	6730,600	3365,290	39,340	0,000
	Temperatura Fundido	2	129,000	64,500	0,750	0,478
	Interação	4	262,800	65,700	0,770	0,553
	Resíduos	36	3079,300	85,540		
	Total	44	10201,600			

A interação entre a T_{Molde} e a T_{Fund} é mostrada no gráfico da Figura 4.8. A interação ocorre quando uma tendência dos resultados é interrompida. Quando a temperatura do fundido é de 240°C esta interação fica mais evidente.

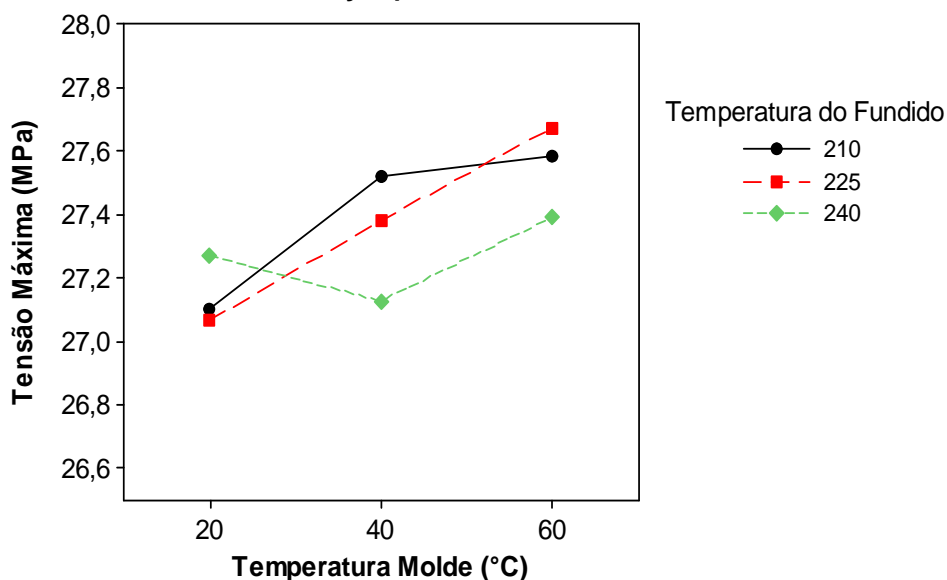


Figura 4.8 – Interação entre a temperatura do molde e do fundido para a tensão máxima.

A Figura 4.9 apresenta os gráficos de efeitos da variação da T_{Molde} e da T_{Fund} nas propriedades mecânicas de tração dos moldados injetados no molde em zamac. Com o aumento da T_{Molde} ocorre o aumento discreto das propriedades mecânicas de tração. Apesar da T_{Fund} ter interação somente com a tensão máxima e não ser significativa para as demais propriedades, percebe-se uma tendência de baixa das propriedades quando a T_{Fund} está em 240°C. Tal fato pode estar relacionado à degradação do polímero, assim como observado em outros estudos (NAGAOKAA *et al.*, 2005 e TANTAKOM e SCHOTT, 1998).

As variações das propriedades de tração encontradas, apesar de serem significativas, foram pequenas, assim como as encontradas por outros autores que também testaram a resposta da variação da temperatura sobre as propriedades de tração do moldado.

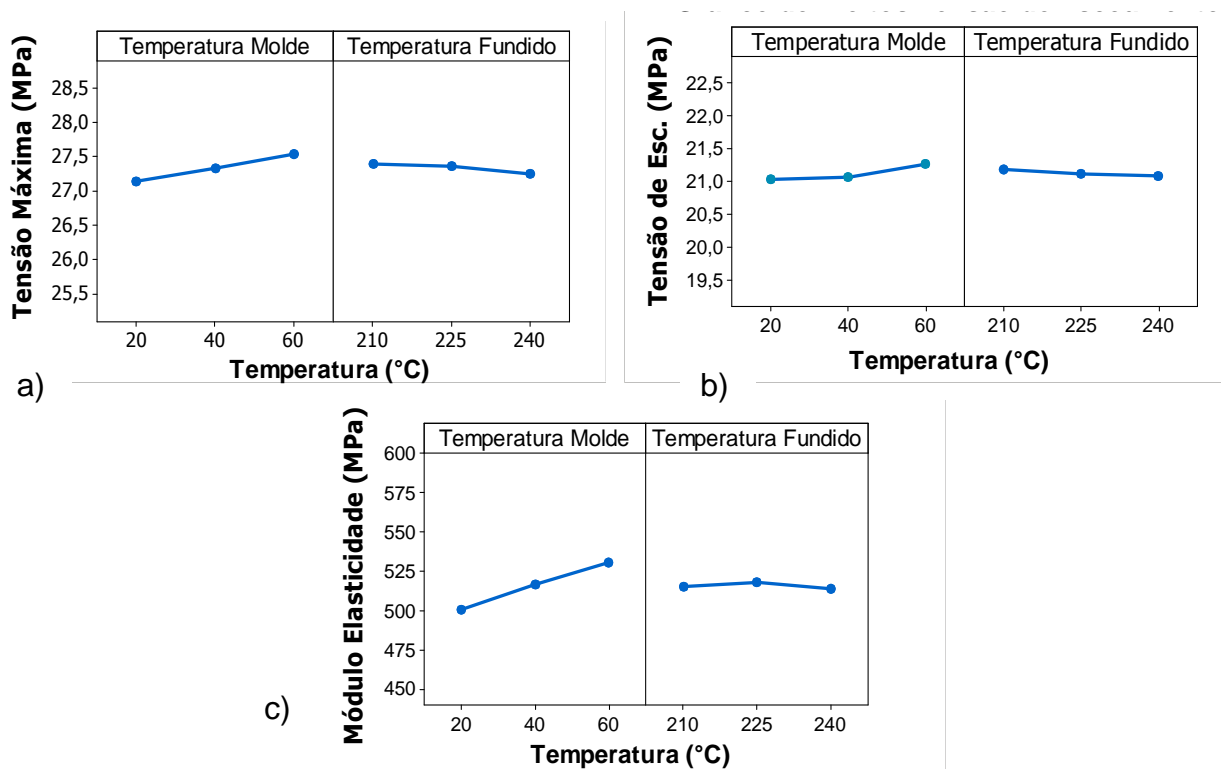


Figura 4.9 – Gráfico de efeitos: a) Tensão Máxima; b) Tensão de Escoamento; c) Módulo de Elasticidade.

Salmoria *et al.* (2008) encontraram diferenças na ordem de 4%, Wright e Dunk (1988) de 6%, ambos utilizando um PP homopolímero. Banik (2008) relata uma variação insignificante para os seus ensaios de tração e impacto. Segundo o autor estas pequenas diferenças encontradas não condizem com as grandes diferenças morfológicas encontradas nestes moldados.

As variações das propriedades de tração ocorreram mesmo com as cristalinidades serem estatisticamente iguais. Geralmente os estudos ligam o aumento de T_{Molde} ao aumento da cristalinidade e esta por sua vez influencia as propriedades de tração (WRIGHT e DUNK, 1988 e BARETA, 2007). Porém, Salmoria *et al.* (2008), explanado anteriormente na seção 2.7, analisando a influência de diferentes materiais de molde sobre as propriedades do moldado obtiveram propriedades de tração idênticas para moldados com diferenças de cristalinidade de 17%. Os autores, porém, não discutem tal fato. Outros fatores que não estão ligados à cristalinidade podem contribuir nas propriedades mecânicas de tração. Entre estes fatores estão:

- A espessura das lamelas, assim como defendido por Stern (2005), Schrauwen *et al.* (2004) e Séguéla (2002) *apud* Stern (2005);
- A morfologia e a proporção entre as diferentes camadas que compõem o moldado citado por Viana (2004);
- A orientação molecular estudada por Mendoza *et al.* (2003) e Almeida, Branciforti e Bretas (2007);
- As tensões residuais elencada por Banik (2006).

Com os resultados iguais de cristalinidade entre os moldados obtidos neste estudo e com base nos estudos dos autores acima, algumas hipóteses podem ser levantadas para o aumento das propriedades de tração. Ao analisar os resultados do ensaio de tração (Tabela 4.4), é possível notar que os maiores desvios dos resultados ocorreram nas temperaturas mais baixas do molde, o que podem ter sido causados pelas tensões residuais. O aumento da T_{Molde} pode ter diminuído a espessura da pele, e assim, obtido um moldado com uma morfologia e cristalinidade mais homogênea, o que também vem a diminuir as tensões residuais, trazendo melhoras nas propriedades mecânicas. O maior relaxamento molecular e um possível aumento na espessura das lamelas, devido à taxa de cristalização mais lenta, também podem ter sido a causa do aumento nas propriedades mecânicas de tração das amostras.

4.3.3 Regressão para as Propriedades de Tração

A Tabela 4.7 mostra o resultado da ANOVA para regressão linear. A regressão foi feita somente com o fator T_{Molde} , por esta ter se mostrado estatisticamente significativa na análise da variância mostrada na Tabela 4.6. Porém, para a regressão da tensão máxima, a T_{Fund} foi mantida em função da interação entre os fatores.

O coeficiente de determinação (R^2), que é obtido através da divisão SQ da regressão pela SQ total, indica percentualmente o quanto a variável dependente consegue ser explicada através da variação do fator (MONTGOMERY, 2004). Para Cohen (1988), valores entre 10 e 29% podem ser considerados pequenos; entre 30 e 49% são médios; e valores entre 50 e 100% são interpretados como grandes.

Dancey e Reidy (2005) citam uma classificação ligeiramente diferente: entre 10 até 30% (fraco); entre 40% até 60% (moderado) e entre 70 até 100% (forte).

Tabela 4.7 – ANOVA para regressão linear em função das propriedades de tração.

Propriedades	Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Tensão Máxima	Regressão	3	1,531	0,510	12,740	0,000
	Temperatura Molde	1	0,215	0,215	5,380	0,025
	Temperatura Fundido	1	0,053	0,053	1,320	0,258
	Interação	1	0,164	0,164	4,090	0,050
	Resíduos	41	1,642	0,040		
	Falta de ajuste	5	0,417	0,083	2,450	0,052
	Erro puro	36	1,225	0,034		
	Total	44	3,173			
	R ² = 48,25%					
Tensão Escoamento	Regressão	1	0,434	0,434	6,830	0,012
	Temperatura Molde	1	0,434	0,434	6,830	0,012
	Resíduos	43	2,736	0,064		
	Falta de ajuste	7	0,738	0,105	1,900	0,098
	Erro puro	36	1,997	0,055		
	Total	44	3,170			
	R ² = 13,7%					
Módulo de Elasticidade	Regressão	1	6715,500	6715,540	82,830	0,000
	Temperatura Molde	1	6715,500	6715,540	82,830	0,000
	Resíduos	43	3486,100	81,070		
	Falta de ajuste	7	406,800	58,120	0,680	0,688
	Erro puro	36	3079,300	85,540		
	Total	44	10201,600			
	R ² = 65,83%					

O valor do R² para a tensão de escoamento foi de apenas 13,7%. O alto valor dos resíduos, que indica a variabilidade dentro das amostras, em relação à variabilidade entre os tratamentos foram responsáveis pela baixa qualidade de ajuste representada por R² (MONTGOMERY, 2004).

O P valor < 0,05 da análise da ANOVA para a T_{Molde} indica que pelo menos uma das médias é diferente das demais. Para um fatorial que apresente três níveis, como o deste trabalho, é importante que as três médias sejam diferentes para o melhor ajuste do modelo linear. O modelo proposto por Tukey (1953) *apud* Costa Neto (1977) conhecido como teste de Tukey permite comparar as médias de maneira mais minuciosa. Há dois métodos de análise Tukey para os resultados: o de comparações pareadas e a análise simultânea (COSTA NETO, 1977). O método de comparações pareadas exibida na Tabela 4.8 consiste em dividir as médias por

grupo, sendo essas nomeadas por letras. Médias diferentes não compartilham a mesma letra, do contrário, possuirão letras iguais ou compartilhadas. O teste Tukey para comparações pareadas foi aplicado nas três propriedades de tração estudadas: tensão máxima, tensão de escoamento e módulo elástico. Para a tensão de escoamento a média na T_{Molde} de 20°C é apenas diferente da média de 60°C. Todas as outras propriedades possuem médias diferentes.

Tabela 4.8 – Teste de Tukey comparação pareada das médias.

Propriedade	Temperatura Molde	Nº de Amostras	Média (MPa)	Grupo
Tensão máxima	60	15	27,547	A
	40	15	27,340	B
	20	15	27,143	C
Tensão de escoamento	60	15	21,263	A
	40	15	21,054	A B
	20	15	21,022	B
Módulo de elasticidade	60	15	530,069	A
	40	15	516,333	B
	20	15	500,145	C

Na análise simultânea de Tukey, demonstrada na Figura 4.10, o resultado é demonstrado graficamente na qual se as médias forem diferentes o intervalo não irá conter zero. Para a tensão de escoamento a média na temperatura a 20°C só é diferente da média a 60°C, o que ajuda a explicar o baixo valor do coeficiente de determinação (R^2). Para a tensão máxima e para o módulo de elasticidade as três médias são diferentes. O módulo de elasticidade por apresentar a maior diferença entre as médias é o que tem melhor ajuste no coeficiente de determinação (R^2).

Como foi visto anteriormente na Tabela 4.8, os resultados de tração obtidos nos diferentes moldes foram estatisticamente iguais. Este fato, não impede que as médias obtidas sejam aproximadas ainda mais uma das outras, objetivando a busca de protótipos funcionais com maior qualidade.

Através da regressão é possível obter a equação para a otimização de parâmetros ou para predizer valores para as propriedades de resposta. A otimização da tensão de escoamento não foi realizada em função do baixo ajuste no coeficiente de determinação.

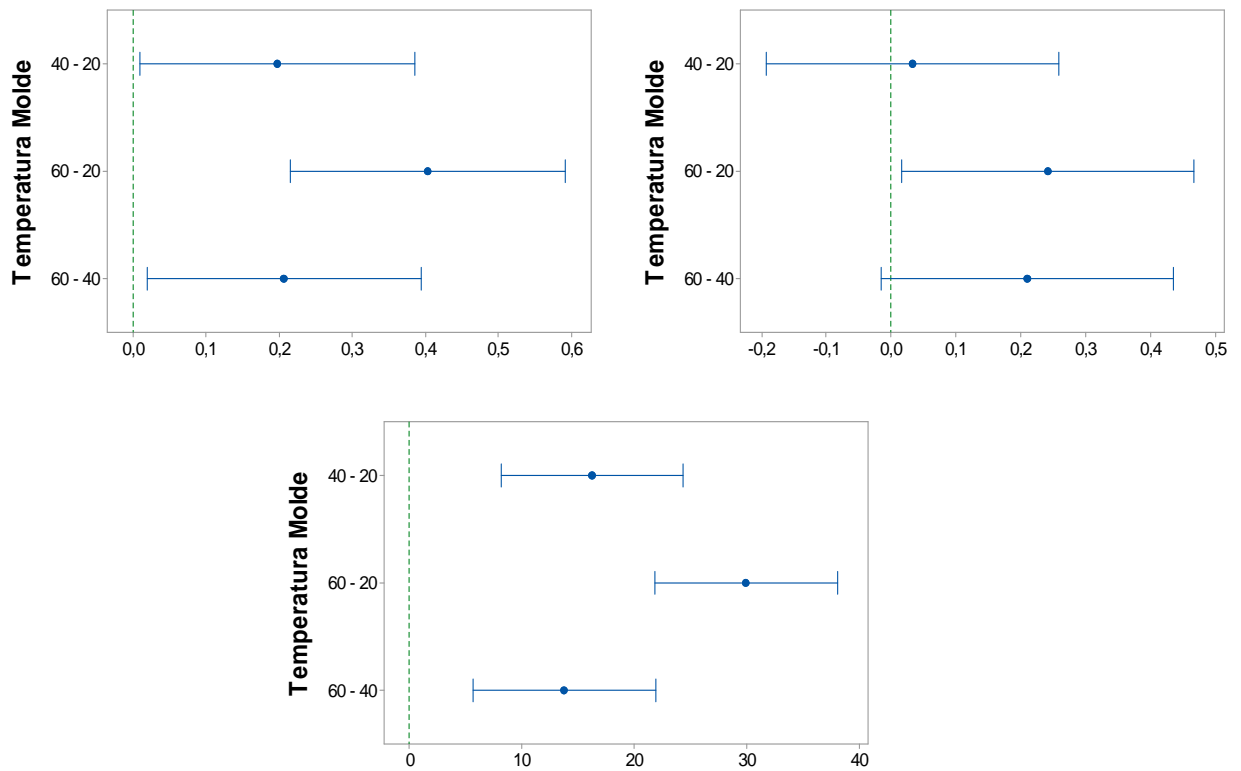


Figura 4.10 – Teste de Tukey simultâneo

A Figura 4.11 representa o gráfico de otimização da T_{Molde} a ser utilizado no molde em zamac-8. O valor alvo de 27,31MPa corresponde a tensão máxima obtido no moldado AM20F210. Para que este valor seja alcançado no moldado obtido no molde em zamac-8 é necessário que a T_{Molde} seja de 46,59°C e a T_{Fund} de 240°C.

$$\text{Tensão Máxima} = 25,28 + 0,0780 T_{\text{Molde}} + 0,00740 T_{\text{Fund}} - 0,000302 T_{\text{Molde}} \times T_{\text{Fund}}$$

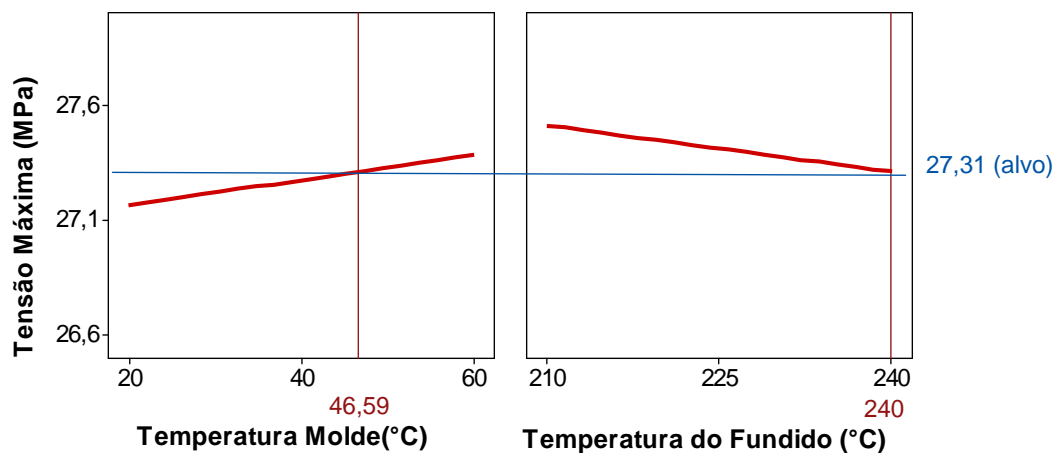


Figura 4.11 – Gráfico de otimização para Tensão Máxima.

Na otimização do módulo de elasticidade, mostrada na Figura 4.12, para que o valor alvo de 504,5MPa, obtido no moldado AM20F210, seja atingido no moldado em zamac-8 é necessário que a T_{Molde} esteja em 25,3°C.

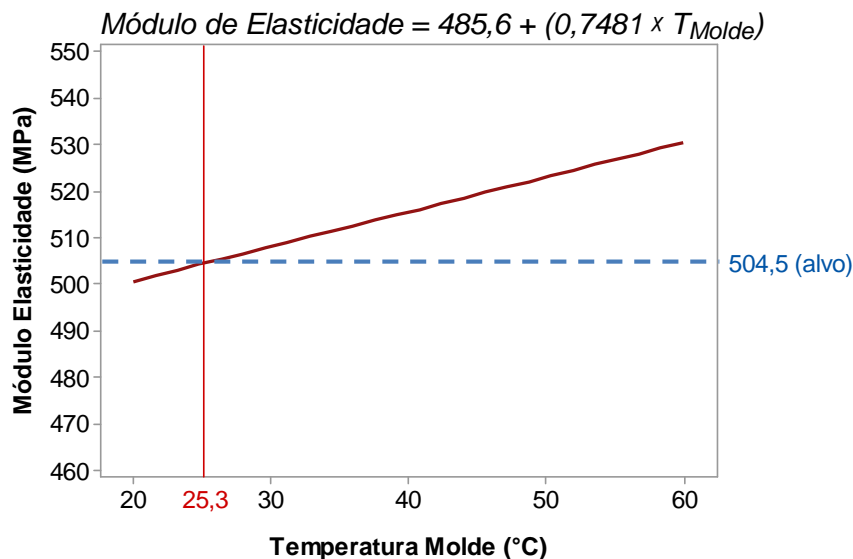


Figura 4.12 – Gráfico de otimização para Módulo de Elasticidade.

4.4 RESULTADO E COMPARAÇÃO DO ENSAIO DE IMPACTO

A Tabela 4.9 representa os resultados do ensaio de impacto para os moldados obtidos no molde em aço e em zamac-8 respectivamente.

Tabela 4.9 – Resultado do ensaio de impacto para o corpo de prova em PP.

Material do molde	Codificação	Energia (J/m)
Aço	AM20F210	56,82 ± 3,600
	ZM20F210	48,30 ± 3,991
	ZM20F225	53,13 ± 3,633
	ZM20F240	48,27 ± 2,845
	ZM40F210	54,37 ± 2,053
Zamac-8	ZM40F225	55,50 ± 1,940
	ZM40F240	52,43 ± 2,238
	ZM60F210	49,62 ± 2,614
	ZM60F225	51,28 ± 0,580
	ZM60F240	53,04 ± 1,687

4.4.1 Influência do Material do Molde em Zamac-8 sobre as Propriedades de Impacto

A Figura 4.13 mostra a comparação dos resultados do ensaio de impacto para os moldados obtidos no molde de aço (AM20F210) e no molde-protótipo em zamac-8 (ZM20F210), com os mesmos parâmetros de injeção.

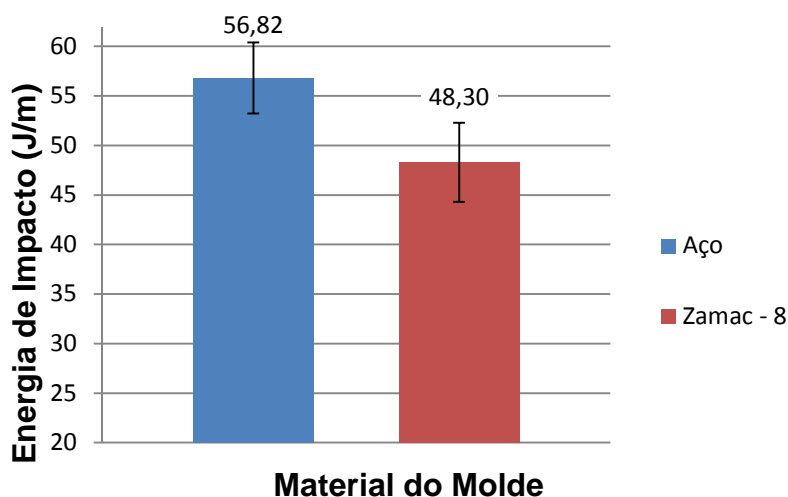


Figura 4.13 – Gráfico comparativo da energia de impacto para os moldados obtidos no em zamac e em aço com os mesmos parâmetros de injeção.

A análise da variância para a comparação dos resultados do ensaio de impacto é mostrada na Tabela 4.10. Através do *P* valor abaixo de 0,05, pode-se concluir que os resultados obtidos nos moldados AM20F210 e ZM20F210 são estatisticamente diferentes.

Os moldados ZM20F210 demonstraram uma menor capacidade da absorção de energia de impacto em relação aos moldados AM20F210. Este resultado não era esperado, uma vez que o molde em zamac-8 possui uma condutividade térmica maior que o molde em aço.

Tabela 4.10 - ANOVA para energia de impacto dos corpos de prova obtidos no molde-protótipo em zamac-8 e no molde em aço.

Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	<i>P</i> valor
Energia de Impacto	1	181,700	181,710	12,620	0,007
Resíduos	8	115,200	14,390		
Total	9	296,900			

Segundo Wright e Dunk (1988) e Henke, Smith e Abbott (1975), maiores taxas de resfriamento levam a menores tamanhos de esferulitos e uma maior orientação molecular, o que deveriam melhorar as propriedades de impacto dos moldados. O caráter frágil dos moldados obtidos no molde em zamac-8 pode ter sido provocado pelo aumento das tensões residuais. Na Tabela 4.10, mostrada anteriormente, observa-se que para as menores temperaturas de molde e de fundido maiores são os desvios o que pode ter sido gerado pelas tensões residuais. Ao se comparar os moldados injetados nos diferentes moldes, analisando somente a média, encontra-se uma diferença de 15% entre eles. Porém, considerando os desvios, é possível concluir que as médias apesar de serem diferentes como foi analisado pela ANOVA podem ter resultados muito próximos.

4.4.2 Efeito da Temperatura do Molde e do Fundido nas Propriedades de Impacto do Moldado Obtido em Zamac-8

Os resultados da energia de impacto dos corpos de prova obtidos nas diferentes temperaturas de molde e de fundido tiveram suas médias comparadas pela ANOVA. Através do P valor menor que 0,05, mostrada na Tabela 4.11, é possível afirmar que a T_{Molde} e a T_{Fund} possui uma influência estatisticamente significativa sobre a energia de impacto. Também é possível observar que existe uma interação significativa entre os dois fatores.

Tabela 4.11 - ANOVA para energia de impacto em função da temperatura do molde e do fundido.

Propriedades	Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Energia de Impacto	Temperatura Molde	2	136,890	68,445	10,230	0,000
	Temperatura Fundido	2	54,660	27,330	4,080	0,025
	Interação	4	77,150	19,288	2,880	0,036
	Resíduos	36	240,910	6,692		
	Total	44	509,610			

A Figura 4.14 mostra a interação entre a T_{Molde} e a T_{Fund} . Com a T_{Fund} em 240°C, a propriedade de impacto apresenta um comportamento diferente em relação ao observado nas demais temperaturas, existindo um acréscimo gradual da energia

de impacto, com o aumento da T_{Molde} . Este comportamento, que difere dos demais parâmetros de temperaturas do fundido utilizados, pode estar relacionado à degradação do material (NAGAOKAA *et al.*, 2005 e TANTAKOM e SCHOTT, 1998). Segundo Cáceres e Canevarolo (2009), para o PP copolímero esta degradação pode ocorrer a partir de 200°C, sendo bem evidente acima de 220°C.

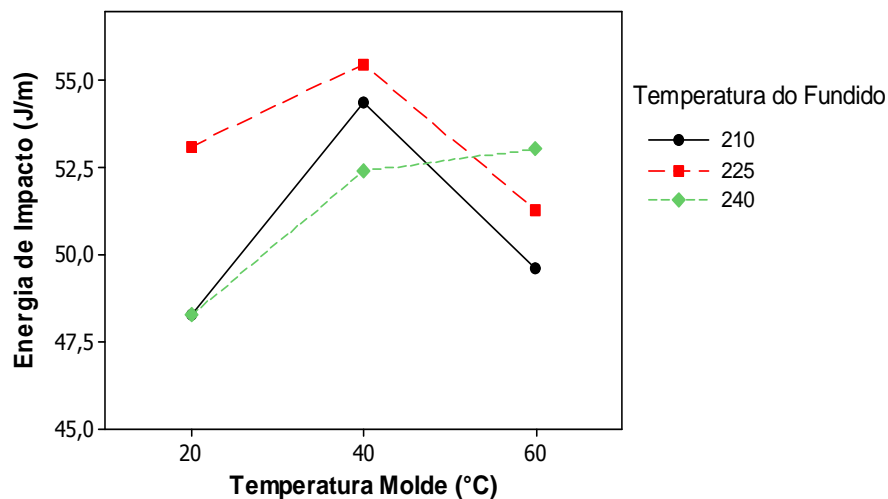


Figura 4.14 – Interação entre as temperaturas do molde e do fundido para a energia de impacto.

O gráfico mostrado na Figura 4.15 demonstra o efeito da variação da T_{Molde} e da T_{Fund} na energia de impacto dos moldados injetados no molde em zamac-8.

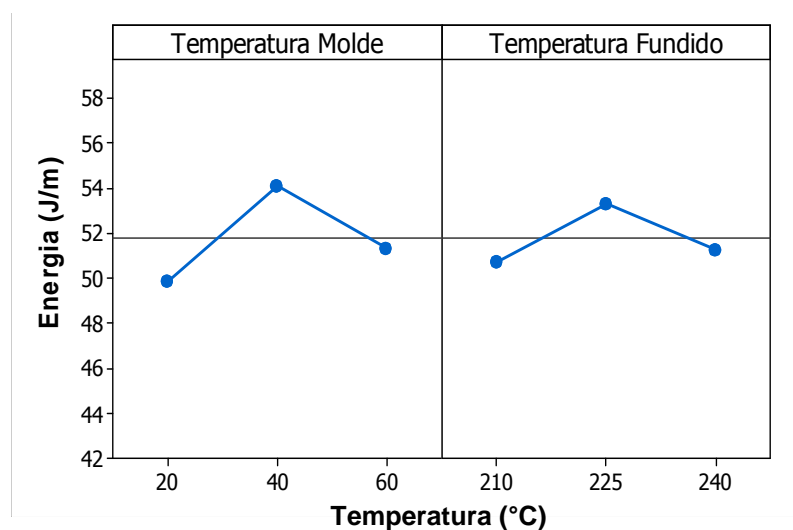


Figura 4.15 – Gráfico de efeito da temperatura do molde e do fundido para a energia de impacto.

A máxima energia absorvida pelo moldado é encontrada para uma temperatura de molde de 40°C e do fundido de 225°C.

O resultado da variação da energia de impacto para uma massa polimérica com a mesma percentagem de cristalinidade pode estar ligada ao tamanho dos esferulitos segundo Azeredo (2010).

Wright e Dunk (1998) afirmam que quanto menor a T_{Molde} e da T_{Fund} menor o tamanho médio dos esferulitos, melhorando assim as propriedades de impacto do moldado. Porém ao se analisar o gráfico de efeitos é observado que a energia máxima de impacto não se encontra nas menores temperaturas. Os maiores desvios para a energia de impacto, encontram-se nas menores temperaturas, e pode estar vinculado a uma maior tensão residual do moldado.

Desta maneira, a tensão residual pode ter contribuído para a obtenção de uma menor energia de impacto para baixas temperaturas, se sobressaindo ao menor diâmetro dos esferulitos. Outra hipótese, é que os resultados aqui obtidos podem estar ligados ao surgimento da orientação do núcleo, que ocorre quando determinada faixa de temperatura é utilizada.

Esta orientação do núcleo foi observada nos estudos de Fujiyama e Azuma (1979) e Mirabella *et al.* (2004) para o PP heterofásico, como explanado na seção 2.3.1. Segundo Fujiyama e Azuma (1979) esta orientação funcionaria como um reforço do moldado, sendo que as maiores energia de impacto foram obtidas quando a orientação do núcleo era máxima.

4.4.3 Regressão para a Energia de Impacto

A Tabela 4.12 mostra a análise da variância para a regressão linear. O P valor maior que 0,05 indica que o modelo não se ajusta à regressão linear. Desta maneira, o modelo de regressão quadrático foi utilizado (COSTA NETO, 1977). A interação entre os fatores não se mostrou significativa para a regressão quadrática, sendo deixada de fora da segunda rodada, a qual é demonstrada na Tabela 4.13. O P valor abaixo de 0,05 para regressão mostra que a regressão quadrática se encaixa aos dados. O coeficiente de correlação foi de 37,59% o que é considerado moderado (DANCEY E REIDY, 2005). Para os moldados obtidos em um mesmo parâmetro de temperatura observaram-se grandes variações na energia de impacto.

Este fato contribuiu para o baixo ajuste da linha de regressão, o que também diminuiu a probabilidade de predição de resultados.

Tabela 4.12 - ANOVA para regressão linear múltipla em função da energia de impacto.

Propriedades	Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Energia de Impacto	Regressão	3	31,571	10,524	0,900	0,448
	Temperatura Molde	1	13,213	13,213	1,130	0,293
	Temperatura Fundido	1	9,389	9,389	0,810	0,375
	Interação	1	14,830	14,830	1,270	0,266
	Resíduos	41	478,036	11,659		
	Falta de Ajuste	5	237,129	47,426	7,090	0,000
	Erro Puro	36	240,907	6,692		
	Total	44	509,607			
R ² = 6,2%						

Tabela 4.13 - ANOVA para regressão quadrática em função da energia de impacto.

Propriedades	Fator	G.L	SQ	QM	F Est.	P valor
Energia de Impacto	Regressão	4	191,550	47,888	6,020	0,001
	Temperatura Molde	1	131,810	131,811	16,580	0,000
	Temperatura Fundido	1	53,250	53,253	6,700	0,013
	Temperatura Molde ²	1	121,910	121,908	15,330	0,000
	Temperatura Fundido ²	1	52,900	52,901	6,650	0,014
	Resíduos	40	318,060	7,951		
	Falta de Ajuste	4	77,150	19,288	2,880	0,036
	Erro Puro	36	240,910	6,692		
Total	44	509,610				
R ² = 37,59%						

A Figura 4.16 representa o gráfico de otimização da T_{Molde} e da T_{Fund} a ser utilizado no molde em zamac-8 com o objetivo de obter um moldado com uma energia de impacto semelhante à obtida em AM20F210. O valor alvo é de 56,82J/m. A T_{Molde} em 42,22°C e da T_{Fund} de 225,78°C correspondem ao ponto máximo da curvatura tendo como valor predito 55,67J/m, sendo cerca de 2% abaixo do alvo. Variando apenas uma das temperaturas, seja apenas do molde ou do fundido em relação às utilizadas em AM20F210 as diferenças entre os moldados são maiores. Mantendo-se a mesma T_{Fund} utilizada no moldado em aço (210°C) e variando apenas a T_{Molde} para 42,22°C o valor predito será de 53,93J/m, sendo 5% menor que o alvo. Mantendo-se a mesma T_{Molde} utilizado no moldado em aço (20°C) e variando

a T_{Fund} para 225,78°C o valor predito é de 52,311J/m, o que corresponde a uma resistência de impacto cerca de 8% menor que o alvo.

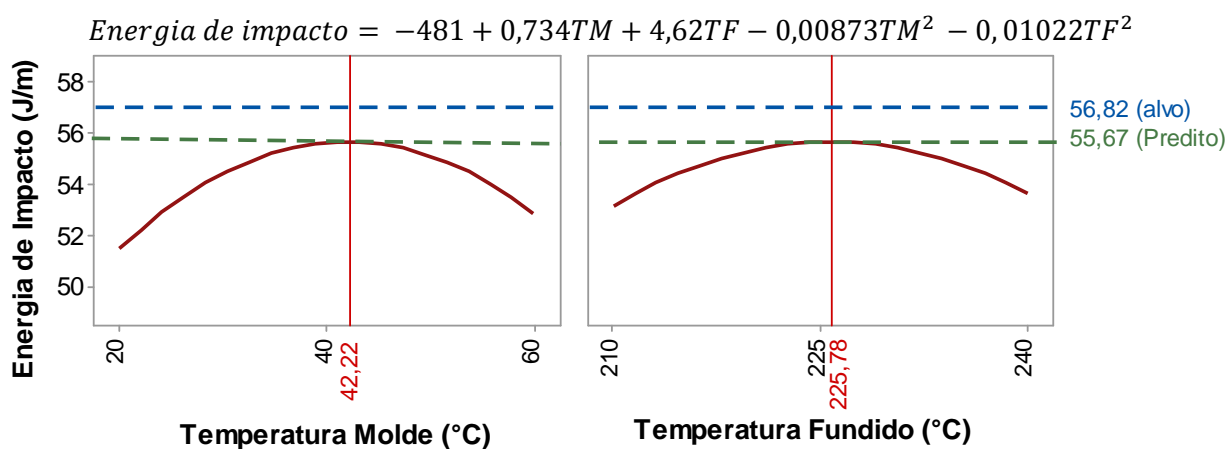


Figura 4.16 – Gráfico de otimização para energia de impacto.

4.5 OTIMIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS VISANDO A OBTENÇÃO DE PROTÓTIPOS FUNCIONAIS NO MOLDE EM ZAMAC-8

A energia de impacto por apresentar influência significativa do zamac-8 foi alvo da otimização das temperaturas. As temperaturas obtidas na regressão para a energia de impacto, foram de 42,22°C para a T_{Molde} e 225,78°C para a T_{Fund} . Ao utilizar-se estas temperaturas, outras propriedades como a tensão máxima e o módulo de elasticidade, que possuem influência deste parâmetros, também serão alterados. Para isto, estas temperaturas foram então substituídas nas fórmulas obtidas na regressão destas propriedades, as quais resultaram nos valores preditos apresentados da Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Predição dos resultados com a variação da T_{Molde} e da T_{Fund} para os moldados obtidos no molde em zamac-8.

Propriedades	Moldado obtido em molde de aço (alvo)	Valores preditos para os moldados em molde em zamac-8	Diferenças %
Tensão Máxima (MPa)	27,31	27,36	+ 0,18%
Módulo de elasticidade (MPa)	504,5	517,18	+ 2,54%
Energia de impacto (J/m)	56,82	55,67	- 2,02%

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou estudar a influência do zamac-8 como material para molde-protótipo nas propriedades do moldado e analisar se, através da variação da T_{Molde} e da T_{Fund} , é possível diminuir esta influência. As propriedades mecânicas escolhidas para análise foram a resistência a tração e ao impacto.

A determinação do percentual de cristalinidade foi obtida com o intuito de investigar sua relação com as propriedades mecânicas. Porém, a cristalinidade não apresentou variação, seja por influência do zamac-8 ou pelas temperaturas do molde e do fundido. Apesar disso, as propriedades mecânicas sofreram algumas variações estatisticamente significativas que não puderam ser explicadas neste estudo pelo percentual de cristalinidade. Desta forma, estas variações devem ter ocorrido por outras variações morfológicas. A maneira como esta cristalinidade média encontra-se dispersa nas diferentes camadas do moldado, o tamanho dos esferulitos, a orientação molecular, a espessura das lamelas e as tensões residuais são alguns dos fatores que podem ter colaborado para as diferentes propriedades mecânicas encontradas. Com isto, outros ensaios para análise da morfologia seriam úteis neste estudo como a microscopia de luz polarizada e a difração por raios X.

A regressão através da variação das temperaturas mostrou-se um método eficiente de aproximar as propriedades mecânicas entre os moldados obtidos em diferentes materiais de molde, ainda que parte da origem desta variação não possa ser explicada através deste estudo. Desta forma, é provável que esta metodologia possa ser aplicada a outros pares de material de molde e moldado.

5.2 CONCLUSÃO

A cristalinidade média do PP copolímero heterofásico não sofreu influência do material do molde. Também a variação da T_{Molde} e da T_{Fund} não causaram variações estatisticamente significativas na cristalinidade.

Para iguais condições de injeção, o molde-protótipo em zamac-8 também não influenciou de forma significativa as propriedades de tração dos moldados em PP, quando comparado com o moldado injetado em molde de aço. Já para a energia de impacto, a influência do zamac-8 foi significativa, resultando moldados com uma capacidade de absorção de energia de impacto 15% menor ao moldado em aço.

A T_{Molde} mostrou ter correlação linear positiva sobre a propriedade de tração, porém esta correlação é fraca. Para a energia de impacto a influência também é significativa, mas o comportamento não é linear e sim quadrático, onde um valor máximo pode ser observado para uma temperatura de molde em 40°C.

A T_{Fund} não se mostrou significativa para as propriedades de tração, mas mostrou uma tendência de diminuição destas propriedades com o aumento da temperatura. Para a energia de impacto, a T_{Fund} apresentou uma relação quadrática significativa, sendo que a energia de impacto máxima é observada com a T_{Fund} em 225°C.

O molde em zamac-8 não apresentou influência significativa sobre a cristalinidade e as propriedades de tração dos moldados em PP CP-204. Porém, para a resistência ao impacto, a influência do zamac-8 no moldado foi significativa. Através da variação da T_{Molde} e da T_{Fund} , pelo modelo de regressão proposto, é possível reduzir esta influência. Com a T_{Molde} em torno de 40°C e da T_{Fund} em 225°C, aumenta a probabilidade de se obter no molde-protótipo em zamac-8, protótipos funcionais com propriedades mais próximas ao produto final, injetado em um molde em aço.

Mesmo desconhecendo as fontes das variações das propriedades mecânicas, a otimização das temperaturas proposta mostra-se uma ferramenta importante da predição de resultados. Através dela foi possível, neste estudo, obter moldados com características mais próximas aos moldados obtidos em um molde de aço.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste estudo surgiram alguns aspectos que merecem uma melhor investigação futura, entre elas:

- Avaliar a eficiência da metodologia proposta para diferentes materiais de molde e de moldado;

- Aumentar a faixa de temperatura a ser utilizada no molde;
- Incluir a variação da pressão de injeção juntamente com a variação das temperaturas do molde e do fundido;
- Incluir a análise da morfológica dos moldados com o objetivo de entender a variação das propriedades mecânicas;

REFERÊNCIAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil 2010 da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico**. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil_2010.pdf > Acesso em: 15 julho 2012.

ALMEIDA, A.M.; BRANCIFORTI M.C.; BRETAS, R.E.S. **Avaliação da orientação molecular de moldados de polipropileno utilizando figuras de pólo obtidas por difração de raios X**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 17, n. 1, p. 28-35, 2007.

AMORIM, J.R. **Sistemática para Fresamento e Montagem de Postiços em Insertos Poliméricos para Moldes-Protótipo**. Dissertação de Mestrado. PPGEM – UTFPR. Curitiba, 2006.

ARMSTRONG, M.C. **Rapid prototyping and bridge-to-production of plastic parts using cast moulds**. Artigo Técnico. Nova Iorque. Disponível em: <http://www.armstrongmold.com/pages/rapidarticle.html>; acesso em: 10 janeiro 2013.

AZEREDO, A.P. **Estudo e avaliação de diferentes nucleantes na morfologia e propriedades do polipropileno**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

BANIK, K. **Effect of mold temperature on short and long-term mechanical properties of PBT**. Express Polymer Letters, v.2, n. 2, p. 111–117, 2008.

BANIK, K. **Process-induced Long-term Deformation Behavior of Injection Molded Semicrystalline Thermoplastics**. Tese Doutorado. Faculty of Mechanical Engineering at Chemnitz University of Technology, Institute of Mechanical and Plastics Engineering. Chemnitz, 2006.

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.

BARETA, D.R. **Estudo comparativo e experimental de materiais aplicados a insertos macho de moldes de injeção dentro do conceito de molde híbrido**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2007.

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.

BOHLER-UDDEHOLM, Divisão de aços. Disponível em: <http://www.buau.com.au/english/files/1045.pdf>. Acesso em: 17 novembro 2013.

BOLLIN, S.C.W. **The effect of injection molding conditions on the near-surface rubber morphology, surface chemistry, and adhesion performance of semi-crystalline and amorphous polymers.** Tese Doutorado. University of Michigan. Michigan, 2010.

BOTHA, L. **The effect of in-process ethylene incorporation on the evolution of particle morphology and molecular characteristics of commercial Heterophasic Ethylene Propylene Copolymers (HEPCs).** Tese de Doutorado. Stellenbosch University. South Africa, 2014.

BRASKEM S.A. Disponível em: http://www.sk-kunststoff.com/CP_204_eng.pdf. Acesso em: 17 novembro 2013.

CÁCERES, C.A.; CANEVAROLO Jr.S.V. **Degradação do polipropileno durante a extrusão e a geração de compostos orgânicos voláteis.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 79-84, 2009.

CALLISTER, Jr.W. **Materials Science and Engineering – an introduction;** 2ª Ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CANEVAROLO Jr.S.V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros;** 2ª Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CAVALHEIRO, A.Z. **Influência dos parâmetros de moldagem na estrutura e propriedades de peças de paredes espessas e finas de polipropileno isotático injetadas em moldes-protótipo fabricados por vazamento de resina epóxi.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

CERMÁK, R.; OBADAL, M.; PONÍZIL, P.; POLÁSKOVÁ, M.; STOKLASA, K.; LENGÁLOVA, A. **Injection-moulded α - and β -Polypropylenes: I. Structure vs. Processing Parameters.** *European Polymer Journal*, v. 41, p. 1838–1845. República Theca, 2005.

CERMÁK, R.; OBADAL, M.; PONÍZIL, P.; POLÁSKOVÁ, M.; STOKLASA, K.; HEBKOVÁ, J. **Injection-moulded α - and β -Polypropylenes: II. Tensile properties vs. processing parameters.** *European Polymer Journal*, v. 42, p. 2185–2191. República Theca, 2005.

CHEN, Y. **Computer-aided design for rapid tooling: methods for mold design and design-for-manufacture.** Tese de Doutorado. Georgia Institute of Technology. Atlanta, 2001.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2ª Ed. New Jersey: Erlbaum, 1988.

CORRÊA, A.X. **Avaliação da influência da degradação com peróxido nas propriedades de polipropileno randômico com eteno ou buteno**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

COSTA NETO, P.L.O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre: Ed. Artmed, 2006.

DUPONT. **Guia de Moldagem**. Disponível em: http://www2.dupont.com/Plastics/pt_US/assets/downloads/manuals/DuPont_Minlon_Zytel_Moldagem.pdf; acesso em: 11 Novembro 2013.

FUJIYAMA, M.; AZUMA, K. **Skin/core morphology and tensile impact strength of injection-molded Polypropylene**. Journal of Applied Polymer Science, v. 23, p. 2807-2811, 1979.

FUJIYAMA, M.; WAKINO, T. **Distribution of Higher-Order Structures in Injection Moldings of Particulate Filled Polypropylenes**. Journal of Applied Polymer Science, v.43, p. 97-128,1991.

FUJIYAMA, M.; WAKINO, T.; KAWASAKI, Y. **Structure of skin layer in injection molded polypropylene**. Journal of Applied Polymer Science, v.35, p. 29-49, 1988.

GODEC, D.; SERCER, M.; SOKELE, M.,R. **Influence of Hybrid Mould on Moulded Parts Properties**. Rapid Prototyping Journal, v. 14, n. 2, p. 95-101. 2008.

GRESTENBERGER, G.; POTTER, G.D.; GREIN, C. **Polypropylene/ethylene-propylene rubber (PP/EPR) blends for the automotive industry: Basic correlations between EPR-design and shrinkage**. EXPRESS Polymer Letters, v.8, p. 282–292, 2014.

GRYZINSKI, I. **Aplicação de Liga de Zinco em Molde-protótipo Usinado e Análise do Moldado em polipropileno**. Dissertação de Mestrado. PPGEM – UTFPR. Curitiba, 2011.

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos – Projetos e Princípios Básicos**. São Paulo: Artiber Editora , 2004.

HARRIS, R.A.; HAGUE, R.J.M.; DICKENS, P.M.; NEWLYN, H.A. **The Structure of Parts Produced by Stereolithography Injection Mould Tools and the Effect on**

Part Shrinkage. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 44, p. 59-64, 2004.

HENKE, S.J.; SMITH, C.E.; ABBOTT, R.F. **Effect of mold temperature on the morphology and properties of polypropylene: I. A propylene-ethylene copolymer.** Polymer Engineering & Science, v.15 p. 79-83, 1975.

HOFFMAN, J.D. **Surface nucleation theory for chain-folded systems with lattice strain:curve edges.** Macromolecules, v. 22, p. 3038-3054, 1993.

INNOVA PETROQUÍMICA. **Manual de Injeção.** Desenvolvido pela Innova Petroquímica 2007. Disponível em: http://www.petrobras.com.br/Imagens/elnova/Manual_de_Injecao.pdf acesso em: 15 janeiro 2013.

MACHADO, G. **Estudo da morfologia e cristalinidade em polipropileno isotático submetido a deformação uniaxial em temperatura ambiente.** Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, 2002.

MAIER, C.; CALAFUT, T. **Polypropylene the Definitive User's Guide and Databook.** Norwich, NY: Publicado por Plastics Design Library a division of William Andrew Inc. p. 452, 1998.

MALLOY, R.A. **Plastic Part Design for Injection Molding.** Munich: Hanser Gardner Publications, 1994.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros.** 2ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MARTINHO, P.M.G. **Mechanical design of hybrid moulds - Mechanical and thermal performance implications.** Tese de doutorado. Universidade do Minho. Portugal, 2010.

MATEUS, A.; BÁRTOLO P.J.; MITCHELL G.; SILVA, M.; POUZADA, A.S.; PONTES, A.J. **The effect of thermal conductivity of RIM moulds in kinetics cure.** London: Editora Taylor and Francis, p. 389, 2007.

MENDOZA R.; RÉGNIER, G.; SEILER, W.; LEBRUN, J.L. **Spatial distribution of molecular orientation in injection molded iPP: influence of processing conditions.** Polymer, v. 44, p. 3363–3373, 2003.

MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P. **How to make injection molds,** 3ª ed. Munich: Hanser, 2000.

MIRABELLA, F.M.; STREBEL, J.J.; BLYTHE, C.L.; PHAM, T.N. **Injection molded automotive tpos: a multi-layer composite structure of varied orientations**. *Polymer Engineering & Science*, v. 44, p. 1588–1593, 2004.

MONTGOMERY, D.C. **Diseño y análisis de experimentos**. 2ª Ed. México: Limusa Editora, 2004.

MUKTEVI, S.S. **Analysis of Effects of Esing Aluminium as Mold Material in Plastic Injection Molding for Automotive HVAC Ducts**. Dissertação de Mestrado. California State University. Sacramento, 2011.

NAGAOKAA, T.; ISHIAKUA, U.S.; TOMARIB, T.; HAMADAA, H.; AKASHIMAA, S. **Effect of Molding Parameters on the Properties of PP/PP Sandwich Injection Moldings**. *Polymer Testing*, v. 24, p. 1062–1070. Osaka, 2005.

NETTO, A.S.C. **Proposta de sistemática para avaliação de soluções de projeto, de componentes moldados por injeção, auxiliadas por protótipos físicos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

NETZSCH. **Determination of the degree of crystallinity of polymers (PE and PP)**. Disponível em: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com>; acesso em: 05 Maio 2014.

OJEDA, T. **Copolímeros de Propileno-etileno com Baixos Teores de Etileno: Estrutura, Morfologia e Propriedades**; Tese Doutorado. Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, UFRGS. Porto Alegre, 1996.

OZCELIK, B.; OZBAY, A.; DEMIRBAS, E. **Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding**. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 37, p. 1359–1365. Turquia, 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. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2008.

PROVENZA, F. **Moldes para Plásticos**. São Paulo: Editora F. Provenza. Pro-Tec, 1991.

ROSATO, Don. V.; ROSATO, Dom. V. **Injection Molding Handbook**. Londres: Chapman & Hall, 1994.

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*, v. 18, n. 3, p. 262-269, 2008.

SANTOS, A.F. **Efeito da irradiação por feixe de elétrons sobre as propriedades físicas e químicas de uma resina de polipropileno**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2011.

SCHRAUWEN, B.A.G.; JANSSEN, R.P.M.; GOVAERT, L.E.; MEIJER, H.E.H. **Intrinsic Deformation Behavior of Semicrystalline Polymers**. *Macromolecules*, v. 37, p. 6069-6078, 2004.

SIEGEL, E.; VOLPATO, N.; GAEBLER, W.G.; **Moldes-protótipo – um estudo comparativo de processos de fabricação**. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM. Salvador, 2008.

SILVA, M.; MATTHEW, A.; BARTOLO, P.; POUZADA, A.S.; PONTES, A.J.; OZBAY, A.; DEMIRBAS, E. **The effect of mould materials in the performance of moulded products by rim**. IV Internacional Materials Symposium. Portugal, 2007.

SOMANI, R.H.; YANG, L.; ZHU, L.; HSIAO, B. **Flow-induced shish-kebab precursor structures in entangled polymer melts**. *Polymer* v. 46, p. 8587–8623, 2005.

STERN, C. **On the Performance of Polypropylene between synthesis and end-use**. Tese de doutorado. University of Twente. Enschede, 2005.

TANTAKOM P., SCHOTT, N.R. **Processing strategies for thin wall injection molding**. ANTEC. Atlanta: Brookfield Society of Plastics Engineering, 1998.

THYREGOD, P. **Modelling and monitoring in injection molding**. Tese de Doutorado - Technical University of Denmark. Dinamarca, 2001.

VANDRESEN, M. **Aplicação da Técnica do Núcleo Perdido na Injeção de Peças Complexas em Moldes de Ferramental Rápido, a partir de Estereolitografia**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

VIANA, J.C. **Development of the skin layer in injection moulding: phenomenological model**. *Polymer*, v. 45, p. 993–1005. Portugal, 2004.

VIANA, J.C.; CUNHA, A.M.; BILLON, N. **The effect of the skin thickness and spherulite size on the mechanical properties of injection mouldings**. *Journal of Materials Science*, v. 36, p. 4411-4418, 2001.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida/Ferramental Rápido no Processo de Desenvolvimento de Produto**. Máquinas e Metais, n. 401, p. 76-89, 1999.

VOLPATO, N.; AMORIM, J.R. **Uma Análise do Desempenho de Resinas Termofixas Usadas como Insertos Para Ferramental Rápido**. Plástico Industrial, v. 77, p. 88-107, 2005.

VOLPATO, N.; AMORIM, J.R.; DERENIEVICKI, O.; FOGGIATTO, J.A.; **Proposta de um banco de dados para auxiliar na seleção de materiais para ferramental rápido usinado**. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM. Recife, 2006.

VOLPATO, N.; GRZYNSKI, I.; NETO, S.C.; **Análise das propriedades do polipropileno injetado em molde de liga de zinco obtido por usinagem**. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF. Caxias do Sul, 2011.

WRIGHT, D.G.M.; DUNK, R. **The effect of crystallinity on the properties of injection moulded polypropylene and polyacetal**. Polymer, v. 29, p. 793-796, 1988.

YANG, H.; LEI, J.; LI, L.; FU, Q.; LI, Z. **Formation of Interlinked Shish-Kebabs in Injection-Molded Polyethylene under the Coexistence of Lightly Cross-Linked Chain Network and Oscillation Shear Flow**. Macromolecules, v. 45, p. 6600–6610, 2012.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Formulário para pesquisa das temperaturas de molde e de fundido utilizados pelas empresas de injeção.

Cargo Ocupado:

- Supervisor
 Técnico
 Operacional

A empresa trabalha ou já trabalhou na injeção de polipropileno copolímero?

- Sim Não

Possui algum sistema de monitoramento da temperatura do molde?

- Não
 Sim Qual:

Qual a temperatura média do molde utilizada durante a injeção do polipropileno copolímero:

__ °C.

Qual o sistema de resfriamento do molde utilizado:

- Água resfriada Água refrigerada
 Outro Qual:

Qual o escalonamento da temperatura utilizada no canhão para a injeção do polipropileno copolímero:

___ °C - ___ °C - ___ °C - ___ °C - ___ °C