

Avaliação do empenamento de peças plásticas injetadas em um molde com diferença de temperatura entre as placas

Determination of the warpage of injected plastics part in a mold with difference of temperature between the plates

Ricardo Pedro Bom

Dr., Professor do Departamento de Eng. Mecânica, CCT/UEDESC
Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais
Joinville, SC, Brasil CEP 89.223-100
dem2rpb@joinville.udesc.br

Vinícius Severo Leães

M.Sc. Eng. Materiais, Whirlpool S.A. Eletrodomésticos
Joinville, SC, Brasil
vinicius_s_leaes@whirlpool.com

Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar o empenamento em peças injetadas em material termoplástico de estrutura amorfa a partir da imposição de uma diferença de temperatura entre as placas do molde e comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos por um aplicativo de simulação de fluxo. Realizou-se a simulação numérica com aplicativo comercial (MOLDFLOW) para obter o empenamento de um corpo-de-prova a partir da variação da temperatura entre as placas do molde de injeção. Os corpos de prova foram obtidos pelo processo de moldagem por injeção manipulando a diferença de temperatura entre as placas do molde de injeção por meio de um sistema de refrigeração. Determinou-se que a diferença de temperatura entre as placas é um fator relevante sendo que quanto maior a diferença de temperatura, maior o empenamento. Observou-se, que a curvatura do corpo de prova empena no sentido da placa mais quente e de que existe uma diferença sistemática entre os resultados experimentais e os dados obtidos por simulação, também de acordo com a literatura.

Palavras Chave: moldagem por injeção, empenamento, tensão residual.

Abstract

The aim of this study is to determine the warpage in injection molded parts with amorphous structure and to compare the experimental results with simulation results. A numerical simulation using commercial software (moldflow) to obtain a warped part through temperature difference between injection mold plates were done. The coupons were obtained through injection molding, manipulating the temperature difference between mold plates through cooling system temperatures. It was observed that the temperatures difference between plates is a major factor regarding warpage, while as great is the temperature difference, greater is the warpage. It was observed that the part warps towards the hottest plate and there is a systematic difference between experimental results and simulation results, as seen in the literature.

Key words: injection molding, warpage, residual stress.

1. Introdução

Atualmente no desenvolvimento de componentes de material plástico existe uma grande preocupação quanto à obtenção de uma peça de baixo custo aliado a excelentes propriedades mecânicas, estéticas e dimensionais, sendo que em muitos casos essas características não são atingidas devido ao empenamento da peça. O empenamento é resultado de deformações que aparecem devido a contração diferencial da peça, o que ocorre devido a condições de material (cristalinidade, fibras), molde (distribuição de temperaturas, material, configuração do canal de ataque), geometria da peça e processamento, entre outros, (Fischer, 2002). Usualmente utilizam-se regras práticas para evitar problemas de empenamento como menciona Poppe *et al.* (2007), entretanto um entendimento mais profundo se faz necessário para um atendimento completo dos requisitos de projeto.

As mais modernas técnicas de simulação por computador auxiliam na previsão do comportamento do empenamento, facilitando antecipadamente a análise do problema e a sua resolução, mas o entendimento detalhado desse fenômeno continua um desafio a ser superado.

Muitos pesquisadores estão empenados em melhorar o entendimento do fenômeno de empenamento e propor alternativas para eliminar o problema. Existem estudos correlacionando a tensão residual com o empenamento como os trabalhos realizados por Choi e Yong-Taek (1999), que executaram análise numérica de encolhimento e empenamento em peças feitas de material amorfo moldadas por injeção, avaliando a tensão residual produzida nas fases de empacotamento e resfriamento. Zoetlief *et al.* (1996) compararam os resultados de tensão residual previstas a partir de simulações com valores experimentais obtidos pela técnica de remoção de camadas. Liu (1996) e Gu *et al.* (2001) avaliaram modelos de simulação numérica para a fase de transformação. Akay *et al.* (1996), verificaram que para polímeros amorfos o fator preponderante no empenamento é a diferença de temperatura entre as placas do molde, além de evidenciar que a previsão feita por programas de simulação é razoável para valores menores da diferença de temperatura entre as placas. Nos trabalhos de Liao *et al.* (2004) e Kramschuster *et al.* (2005) foram utilizados modelos empíricos definidos experimentalmente a partir do uso de planejamento de experimentos fatoriais para mostrar a influência de diversos fatores importantes para o empenamento. No campo da simulação numérica, como menciona Newman (2007), também existem trabalhos visando uma maior assertividade na previsão do empenamento a partir de índices de correção de encolhimento obtidos experimentalmente e que alimentam as informações do material a ser usado na simulação.

2. Materiais e Métodos

No desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um polímero termoplástico de estrutura amorfa, Polystyrol 158 K da Basf. O material utilizado foi secado a 80°C durante duas horas antes de ser moldado por injeção. Foi utilizando uma injetora Battenfeld 250 PLUS com rosca de 22 mm de diâmetro e capacidade de injeção de 34,5 g de poliestireno. Foi utilizado um porta-molde de corpo-de-prova de acordo com norma ASTM D638 tipo 1, como visto na Figura 1.

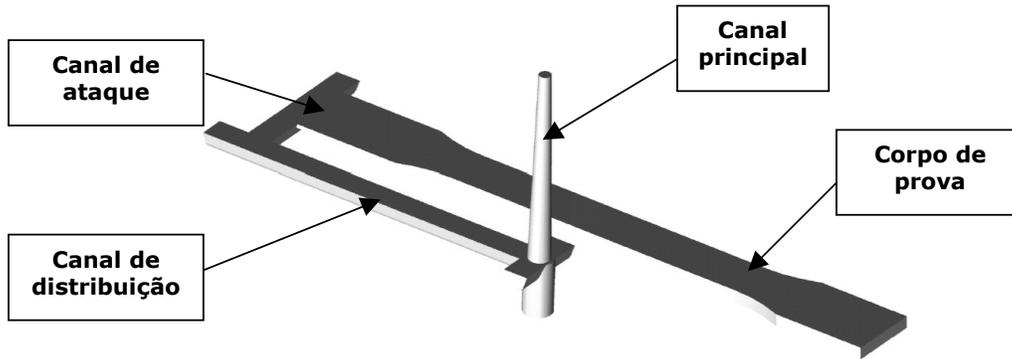


Figura 1: Corpo-de-prova utilizado no experimento (Fonte: Leães, 2008).

Foram injetadas 10 peças para cada gradiente de temperatura entre as placas do molde, definidas como “placa móvel” a parte que contém o molde do corpo de prova (mostrada na Figura 2) e “placa fixa” a que contém o canal principal, sendo que os outros parâmetros de injeção foram definidos a partir de dados do fornecedor do material (BASF, 2006) e simulação numérica, conforme indicado na Tabela 1. A temperatura ambiente no dia variou de 32 a 34°C.

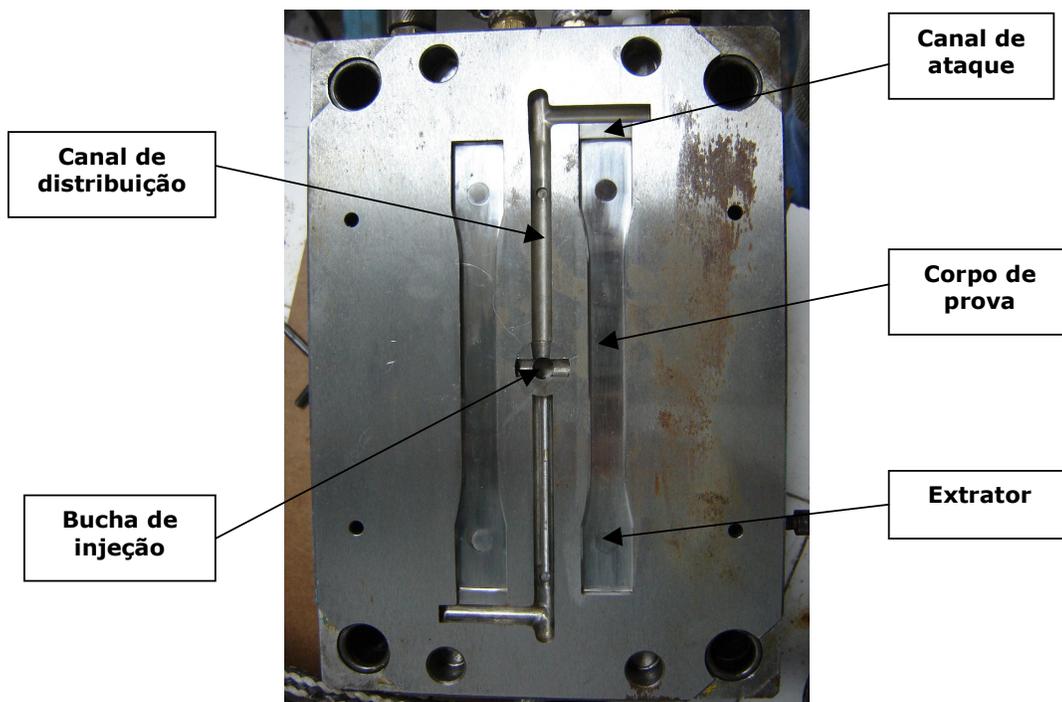


Figura 2: Fotografia da placa móvel do molde de injeção (Fonte: Leães, 2008).

Tabela 1: Parâmetros de processo de injeção determinados por simulação (Fonte: Leães, 2008).

| Parâmetro | Unidade | Experimentos | | | | | | |
|--|---------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Temperatura de injeção | °C | 230 | 230 | 230 | 230 | 230 | 230 | 230 |
| Tempo de injeção | s | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Pressão de injeção | MPa | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Tempo de recalque | s | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Pressão de recalque | MPa | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Tempo de resfriamento | s | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Diferença de temperatura no molde | °C | 2 | 3 | 5 | 9 | 11 | 13 | 18 |
| Temperatura fluido de resfriamento (placa móvel) | °C | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| Temperatura fluido de resfriamento (placa fixa) | °C | 35 | 37 | 45 | 55 | 60 | 65 | 78 |

Para se obter uma diferença de temperatura entre as placas do molde, dois sistemas de refrigeração foram utilizados. Um para a placa fixa, que por meio de um dispositivo de aquecimento e circulação de água a temperatura do molde foi variada. O outro dispositivo de circulação apresentava um reservatório de água com capacidade de 250 litros, que mantinha a placa móvel com temperatura constante. O controle de temperatura foi realizado sobre a superfície superior do molde e na mesma posição onde foram obtidas as temperaturas a partir das simulações, como indicado posteriormente pela Figura 6. As temperaturas foram monitoradas com um termômetro BEHA 93403 type-K com resolução de 1°C.

Os corpos-de-prova foram mantidos em temperatura controlada de 25°C até o momento da medição do empenamento, que foi feita apoiando-se o corpo de prova em uma mesa de desempenho e medindo-se a flecha com um traçador de altura modelo TVM-602 com resolução de 0,01 mm, conforme mostra Figura 3, descontando-se o valor da espessura da peça.

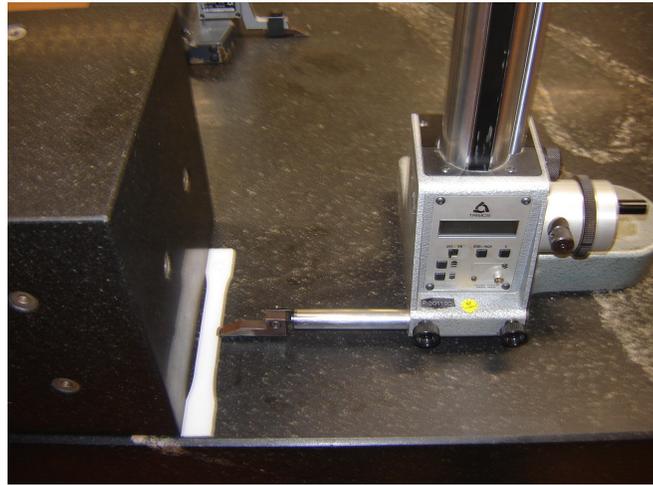


Figura 3: Medição do corpo de prova empenado com traçador de altura (Fonte: Leães, 2008).

A mesma variação de temperatura entre placas e dos circuitos de refrigeração do experimento prático foi imposta no aplicativo (MPI, 2007) para fins de comparação dos resultados.

Para a realização da simulação numérica foi construído o modelo do corpo de prova, canais de refrigeração e dimensões externas do molde de acordo com a ferramenta utilizada nos experimentos práticos, conforme mostra a Figura 4. A caracterização da máquina no Moldflow foi feita de acordo com o banco de dados fornecido pelo fabricante (Battenfeldt, 2006).

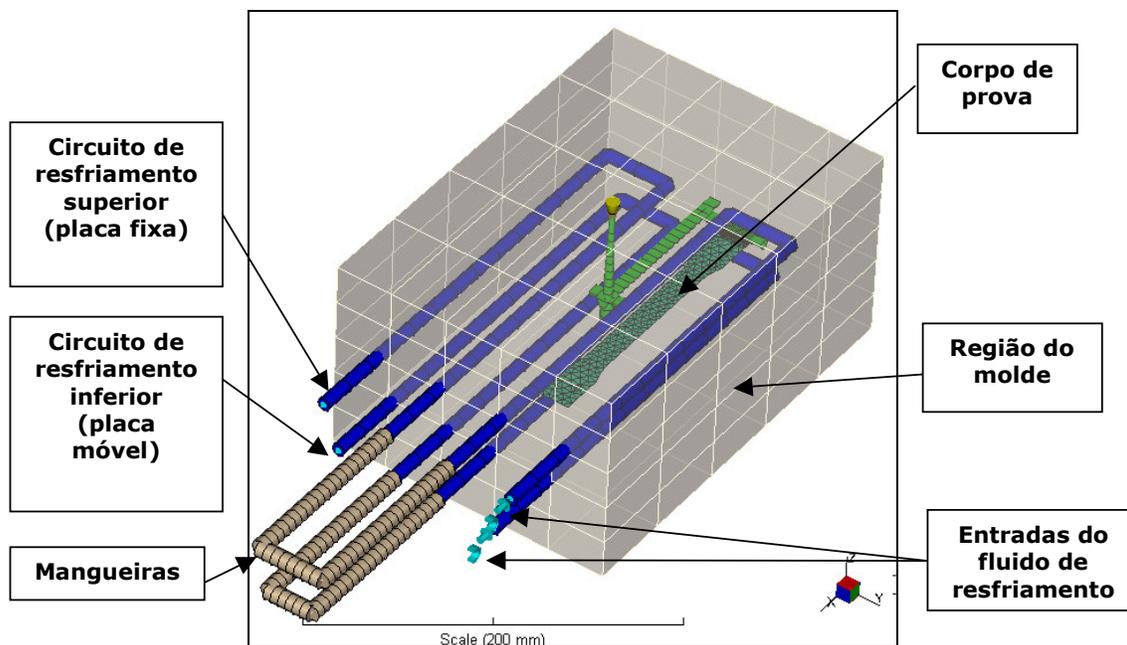


Figura 4: Modelo dos circuitos de refrigeração, molde e corpo de prova utilizados na simulação e experimento.

Os principais parâmetros utilizados na simulação numérica estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Característica da malha utilizada na simulação (Fonte: Leães, 2008).

| Característica | Valor |
|--|------------|
| Tipo de malha | Midplane |
| Número de nós | 993 |
| Número de elementos de linha | 283 |
| Número de elementos triangulares | 1.327 |
| Número total de elementos para parte | 666 |
| Número total de elementos para canal | 61 |
| Número total de elementos para molde | 944 |
| Número total de elementos para circuito | 222 |
| Número total de elementos de casca externa | 722 |
| Hardware utilizado | Pentium IV |
| Tempo de processamento (s) | 27'06 |

A medição do empenamento no aplicativo de simulação, mostrada na Figura 5, foi feita a partir da distância máxima entre o a peça deformada e um plano "âncora", determinado pelos pontos extremos da peça (desconsiderando a região do canal de ataque).

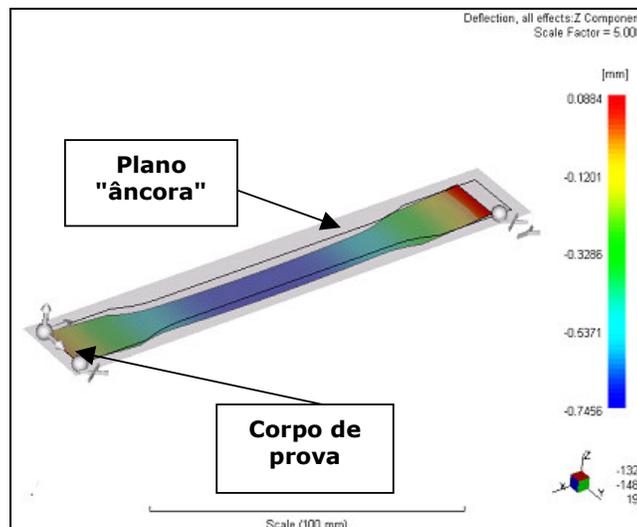


Figura 5: Medição do empenamento no aplicativo de simulação (Fonte: Leães, 2008).

A diferença de temperatura no topo do molde foi verificada no aplicativo de simulação por meio da diferença máxima entre os dois lados do molde, como mostra a Figura 6, de forma análoga à que foi realizada experimentalmente.

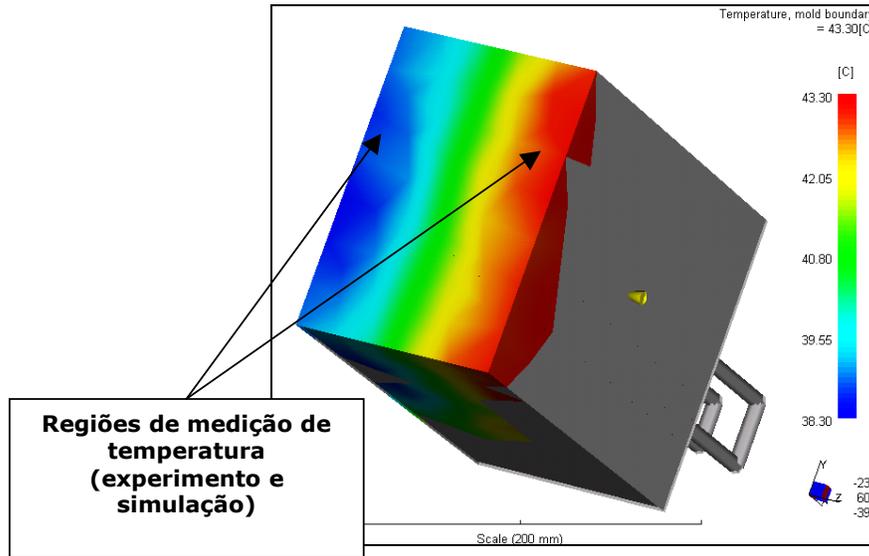


Figura 6: Medição da diferença de temperatura entre as placas do molde (Fonte: Leães, 2008).

3. Resultados e Discussão

Foi verificado, experimentalmente e por simulação, que os corpos de prova estavam empenados e com a concavidade voltada para o lado mais quente do molde, conforme previsto na literatura (Fischer, 2002). Na Tabela 3 estão todos os valores coletados de temperatura e empenamento experimentalmente e por simulação. Algumas diferenças podem ser esperadas devido ao erro experimental de medição e modelos de eficiência do sistema de refrigeração, usados no programa de simulação.

Tabela 3: Resultados obtidos por simulação e medidos em experimento (Fonte: Leães, 2008).

| Parâmetro | Unidade | Experimentos | | | | | | |
|---|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Diferença de temperatura no topo do molde (simulação) | °C | 1,4 | 2,1 | 5 | 9 | 11 | 13 | 18 |
| Diferença de temperatura no topo do molde (medido) | °C | 2 | 3 | 5 | 9 | 11 | 13 | 18 |
| Empenamento (simulação) | mm | 0,037 | 0,078 | 0,241 | 0,449 | 0,561 | 0,662 | 0,946 |
| Empenamento médio (medido) | mm | 0,097 | 0,103 | 0,166 | 0,267 | 0,353 | 0,478 | 0,824 |
| Temperatura placa fixa (simulação) | °C | 36,2 | 37,6 | 43,3 | 50,5 | 54,3 | 58 | 67 |
| Temperatura placa fixa (medido) | °C | 36 | 37 | 41 | 46 | 50 | 54 | 61 |
| Temperatura placa móvel (simulação) | °C | 34,8 | 35,5 | 38,3 | 41,5 | 43,3 | 45 | 49 |
| Temperatura placa móvel (medido) | °C | 34 | 34 | 36 | 37 | 39 | 41 | 43 |
| Desvio padrão do empenamento (medido, tamanho do subgrupo=10) | mm | 0,033 | 0,039 | 0,042 | 0,032 | 0,062 | 0,026 | 0,039 |

Primeiramente foi verificado se a diferença de temperatura imposta experimentalmente foi suficiente para gerar variação perceptível ao sistema de medição empregado. Foi utilizada a ferramenta estatística de comparação dos grupos de dados pelo teste t de Student, disponível no aplicativo JMP 5.1 (JMP, 2006). Esse teste pode ser traduzido de forma visual conforme Figura 7, que mostra que onde existem círculos sobrepostos não existe diferença estatística. A interpretação para o gráfico é de que o sistema de medição utilizado nesse estudo não consegue diferenciar os tratamentos 1 e 2 (com diferença de temperatura entre placas de 35 e 37°C respectivamente). Todos os outros grupos são discriminados adequadamente pelo sistema de medição.

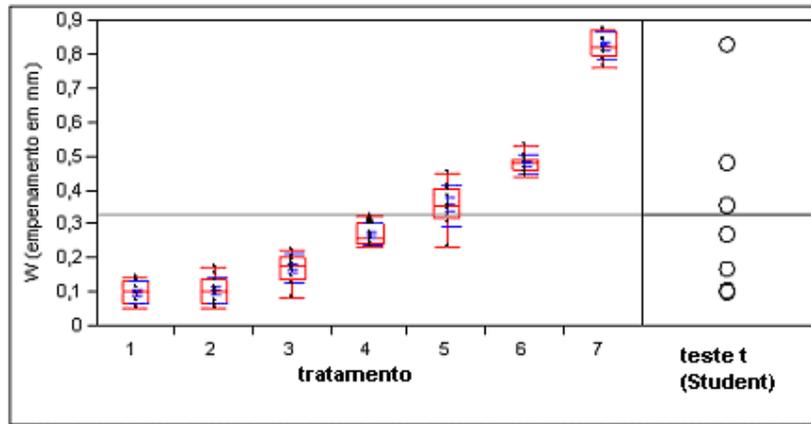


Figura 7: Avaliação estatística dos dados experimentais (Fonte: Leães, 2008).

Comparando-se as temperaturas do topo do molde, como mostra a Figura 8, pode ser verificado que a diferença de temperatura entre os lados do molde é semelhante quando comparados os resultados experimentais com os de simulação.

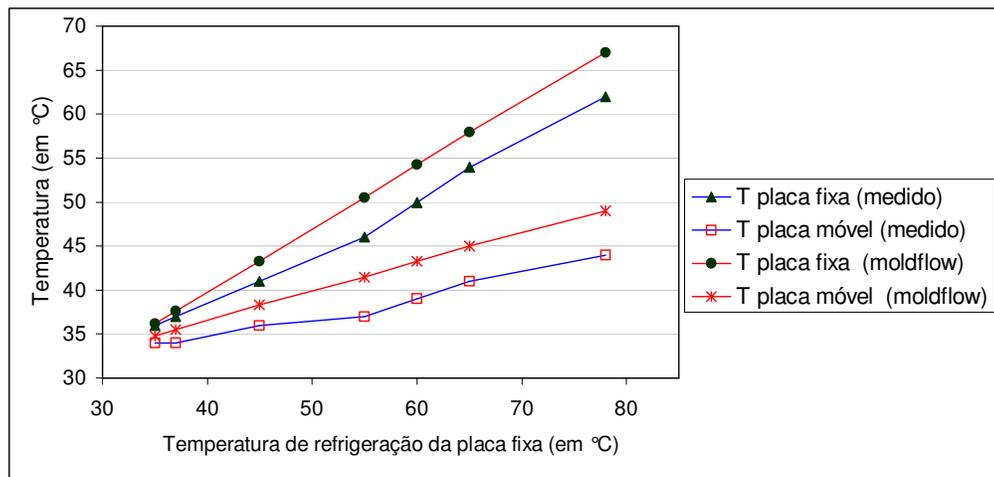


Figura 8: Comparação das temperaturas obtidas experimentalmente e por simulação (Fonte: Leães, 2008).

A construção de um gráfico do empenamento versus diferença de temperatura entre placas do molde, mostrada na Figura 9, evidencia um crescimento linear e diretamente proporcional conforme citado por Akay *et al.* (1996) para a curva gerada pelo aplicativo. Este gráfico também mostra que os valores de simulação tendem a ser maiores devido ao fato de que para o polímero usado não existe correção para os valores de encolhimento (e empenamento) devido a tensão residual gerada na peça dentro do molde, em concordância com Akay *et al.* (1996) e Newman (2007). Outro ponto importante é uma diferença de curvatura entre o conjunto de pontos medidos e da simulação. Os pontos gerados pelo aplicativo mostram uma tendência linear e constante, enquanto que para os pontos obtidos experimentalmente a curva deve ter uma característica polinomial.

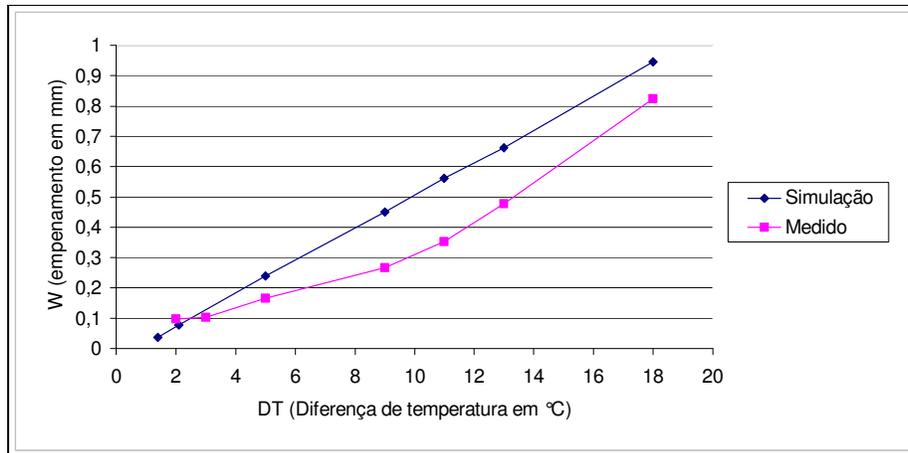


Figura 9: Empenamento x diferença de temperatura entre as placas do molde (Fonte: Leães, 2008).

Utilizando o aplicativo estatístico JMP 5.1 (JMP, 2006) as equações podem ser obtidas para os pontos da simulação (linear): $W = -0,0369 + 0,054326 \times \Delta T$ e para os pontos obtidos experimentalmente (polinomial): $W = 0,0900666 + 0,0022613 \times \Delta T^2$, onde W é o empenamento em mm e ΔT é a diferença de temperatura entre as placas do molde.

4. Conclusão

O objetivo principal do trabalho foi de determinar o empenamento em corpos de prova de poliestireno fabricados pelo processo de moldagem por injeção. Nos experimentos foram impostas diferentes temperaturas entre a placa fixa e placa móvel, os demais parâmetros de processo foram constantes.

Foi verificado que o corpo de prova apresentou empenamento com a concavidade voltada para o lado mais quente do molde e foi determinado que aumentando a diferença da temperatura entre as placas maior foi o empenamento. O maior empenamento obtido foi de aproximadamente 0,83mm para uma diferença de 18°C entre as placas. A variação do empenamento em função da diferença de temperatura não apresentou um comportamento linear e pode ser descrito por um polinômio do segundo grau.

O processo de injeção foi simulado em aplicativo comercial com os mesmos parâmetros experimentais. Como resultado foi obtida uma variação linear do empenamento em função da variação da diferença de temperatura entre as placas.

Obteve-se a mesma ordem de grandeza entre os valores experimentais e simulados, entretanto, os valores simulados sempre foram maiores que os valores experimentais, a existência da diferença está coerente com o previsto nas referências consultadas.

Referências

- AKAY, M.; OZDEN, S.; TANSEY, T. 1996. Prediction of process-induced Warpage in injection molded thermoplastics. *Polymer engineering and science*, **36**(13):1839–1846.
- BASF, 2006. *Características de material*. Acessado em: 15/12/2006, disponível em: www.materialdatacenter.com/cwv/matdb/matdb.php.
- BATTENFELDT. 2006. *Características da máquina de injeção*. Acessado em: 10/12/2006, disponível em: www.sms-k.com/SMS_Startframe/SGT-Startframe_engl/PDFFiles/pdfs_new_june_2005/machines/Plus_e.pdf.
- CHOI, D-S.; YONG-TAEK, M. 1999. *Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding*. *Composite structures*, 1999, **47**: 655-665.
- FISCHER, J.M. 2002. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. Norwich, Plastics Design Library, 252 p.
- GU, Y.; LI, H.; CHANGYU, S. 2001. *Numerical simulation of thermally induced stress and warpage in injection molded thermoplastics*. *Advances in polymer technology*, **20**(1):14-21.
- JMP. 2006. Aplicativo estatístico JMP 5.1 - A business unit of SAS Copyright © 1989-2003 SAS Institute Inc. All rights reserved., Licença Whirlpool Corporation.
- KRAMSCHUSTER, A.; CAVITT, R., ERMER, D.; CHEN, Z., TURNG, L-S. 2005. Quantitative study of shrinkage and warpage behaviour for microcellular and conventional injection molding. *Polymer engineering and science*, **45**(10):1408–1418.
- LEÃES, V.S. 2008. *Avaliação da influência da diferença de temperatura entre as placas de um molde de injeção no empenamento de peças injetadas*. Joinville, SC. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, 158 p.
- LIAO, S.J.; CHANG, D.Y.; CHEN, H.J.; TSOU, L.S.; HO, J.R.; YAU, H.T.; HSIEH, W.H.; WANG, J.T.; SU, Y.C. 2004. Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts. *Polymer engineering and science*, **44**(5):917-928.
- LIU, S-J. 1996. Modeling and simulation of thermally induced stress and warpage in injection molded thermoplastics. *Polymer engineering and science*, **36**(6):807–818.

MPI. 2007. Moldflow Plastics Insight 5.0. Licença Whirlpool Corporation.

NEWMAN, R. 2007. Moldflow plastics Insight 3.0 thermoplastic material Properties database. *Flowfront Magazine*. Acessado em: 06/01/2007, disponível em: www.moldflow.com/flowfront/0109/columns/poly//0109poly.htm.

POPPE, E.A.; LEIDIG, K.; SCHIRMER, K.; WILKINSON, R. 2007. The "Top Ten" Moulding Problems. Acessado em: 08/01/2007, disponível em: [http://plastics.dupont.com/myplastics/Mediator?id=537& locale=en_US](http://plastics.dupont.com/myplastics/Mediator?id=537&locale=en_US).

ZOETLIEF, W.F.; DOUVEN, L.F.A.; HOUSZ, A.J. 1996. Residual thermal stresses in injection molded products. *Polymer engineering and science*, **36**(14):1886–1896.

Submissão: 09/04/2008
Aceite: 02/07/2008