

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA ENTRE AS PLACAS DE UM MOLDE DE INJEÇÃO NO EMPENAMENTO DE PEÇAS INJETADAS ¹

Ricardo Pedro Bom²
Vinícius Severo Leães³

Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar o empenamento em peças injetadas em material termoplástico de estrutura amorfa através da imposição de um diferencial 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 através da variação da temperatura entre as placas do molde de injeção. Os corpos de prova foram obtidos pelo processo de moldagem por injeção manipulando o diferencial 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, conforme referências bibliográficas, 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; Simulação

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE DIFFERENCE BETWEEN INJECTION MOLD PLATES ON INJECTION MOLDED PARTS WARPAGE

Abstract

The objective 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 that exists a systematic difference between experimental results and simulation results, as seen in the literature.

Key words: Injection molding; Warpage; Residual stress; Simulation.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Prof. Dr. Eng., UDESC-CCT / Joinville.

³ Acadêmico do Mestrado em Eng. De Materiais, UDESC-CCT / Joinville

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, conforme Fischer.⁽¹⁾ Usualmente utilizamos regras práticas para evitar problemas de empenamento como menciona Poppe et al.,⁽²⁾ 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 a antecipação do problema e a sua resolução, mas a descrição detalhada desse fenômeno continua um desafio a ser superado. Existem características que afetam empenamento, que são extremamente complicadas de descrever matematicamente como viscoelasticidade, cristalinidade, orientação molecular e anisotropias.

Muitos pesquisadores estão empenhados 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 Choi et al.⁽³⁾ que executou análise numérica de encolhimento e empenamento em peças feitas de material amorfo moldadas por injeção avaliando a tensão residual produzida nas fases empacotamento e resfriamento, assim como Zoetlief, Douven e Housz⁽⁴⁾ que comparou os resultados de tensão previstos com valores experimentais obtidos pela técnica de remoção de camadas. Liu⁽⁵⁾ e Gu, Li, e Changyu⁽⁶⁾ avaliaram modelos de simulação numérica para a fase de transformação. Akay, Ozden e Tansey⁽⁷⁾ verificou que para polímeros amorfos o fator preponderante no empenamento é o diferencial de temperatura entre as placas do molde, além de evidenciar que a previsão feita por programas de simulação é razoável em valores menores de diferencial de temperatura entre as placas. Liao et al.⁽⁸⁾ e Kramschuster et al.⁽⁹⁾ utilizaram 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 também existem trabalhos visando uma maior assertividade na previsão do empenamento através de índices de correção de encolhimento obtidos experimentalmente e que alimentam as informações do material a ser usado na simulação, como menciona Newman.⁽¹⁰⁾

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 utilizando uma injetora Battenfeld 250 PLUS com rosca de 22mm 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.

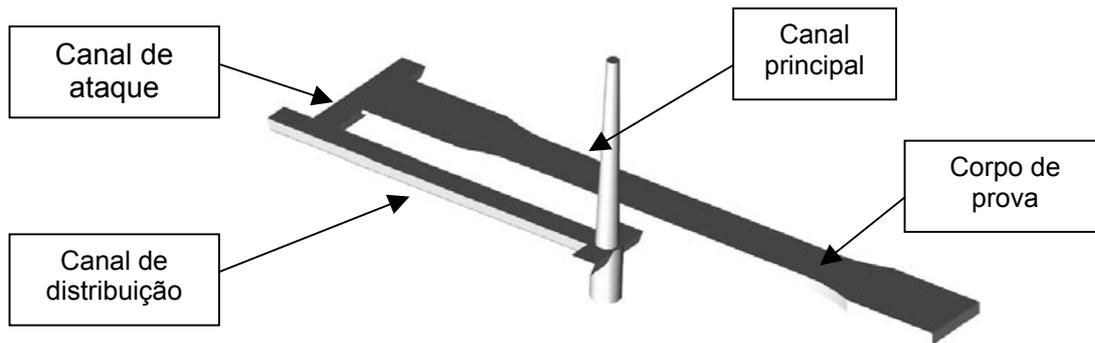


Figura 1 – Corpo de prova utilizado no experimento

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⁽¹¹⁾) e simulação numérica, conforme indicado na Tabela 1. A temperatura ambiente no dia variou de 32 a 34°C.

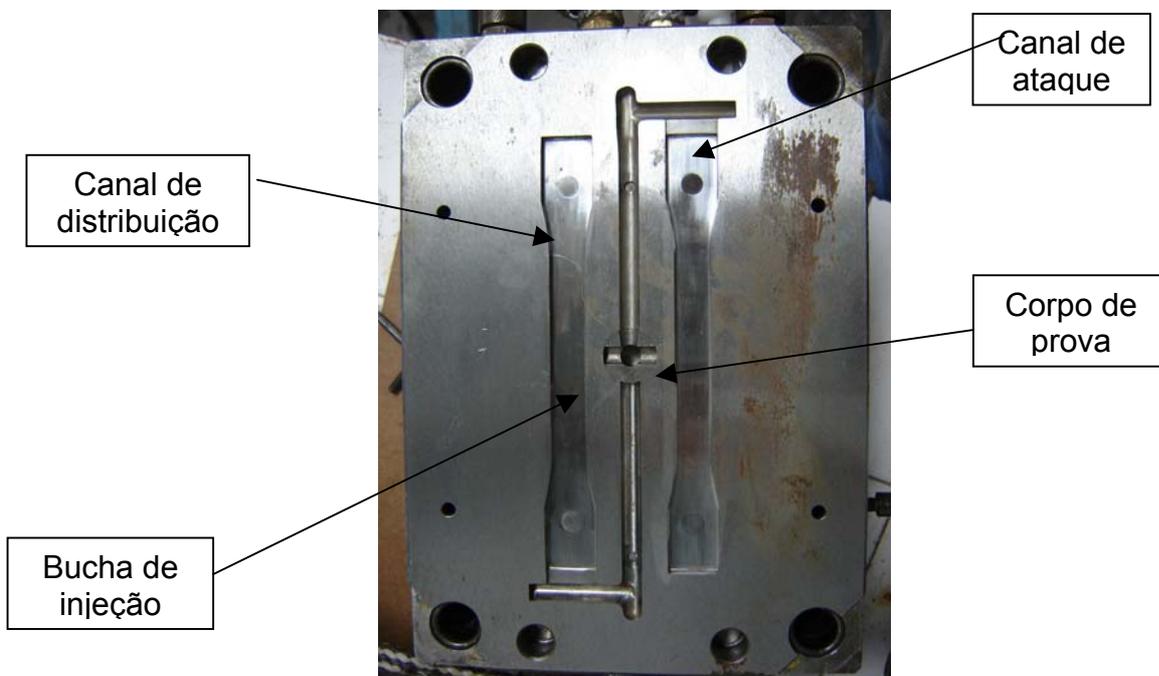


Figura 2 – Fotografia da placa móvel do molde de injeção

Tabela 1 – Parâmetros de processo de injeção determinados por simulação

Parâmetro	Unidade	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
Diferencial 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 um diferencial de temperatura no molde, foi utilizado um sistema de resfriamento independente para cada lado do molde, sendo que o no lado móvel a temperatura foi mantida constante e a temperatura do lado fixo foi manipulada. 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

A mesma variação de temperatura entre placas e dos circuitos de refrigeração do experimento prático foi imposta no aplicativo Moldflow⁽¹²⁾ 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 (Battenfeld⁽¹³⁾).

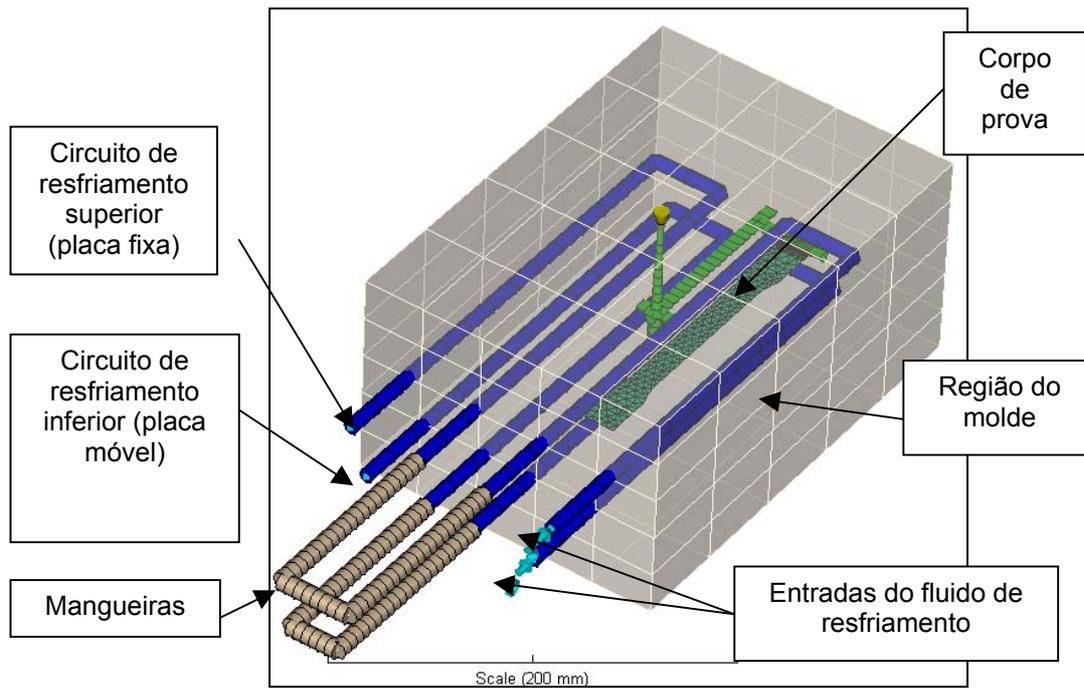


Figura 4 – Modelo dos circuitos de refrigeração, molde e corpo de prova utilizados na simulação e experimento

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).

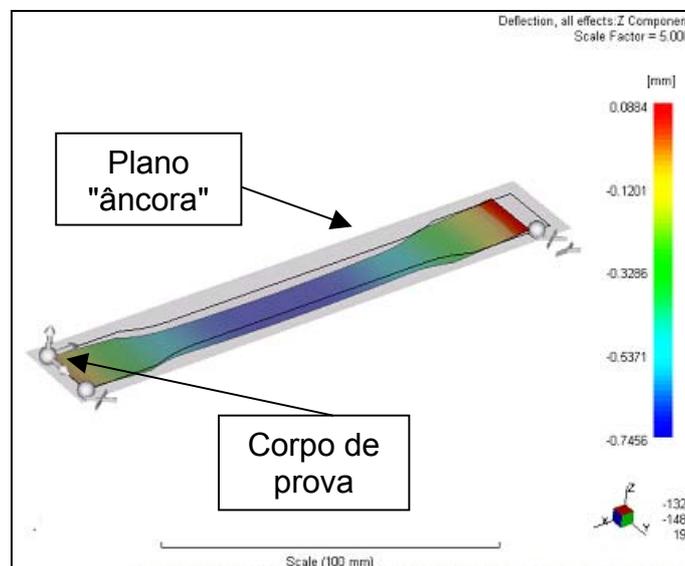


Figura 5 – Medição do empenamento no aplicativo de simulação

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.

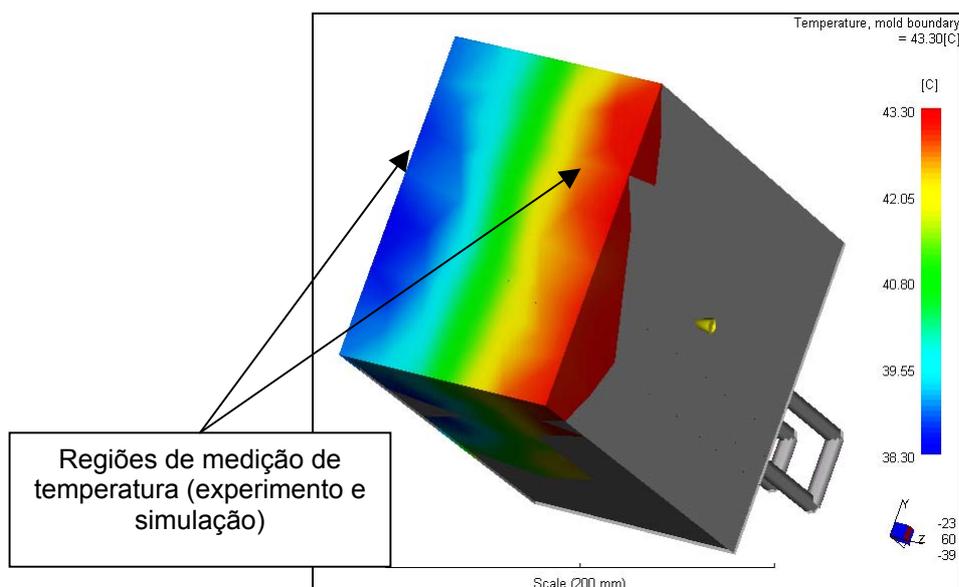


Figura 6 – Medição do diferencial de temperatura entre os moldes

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⁽¹⁾). Na Tabela 2 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 2 - Resultados obtidos por simulação e medidos em experimento

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

Primeiramente foi verificado se o diferencial de temperatura imposto 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 software JMP 5.1.⁽¹⁴⁾ 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 diferencial de temperatura entre placas de 35 e 37°C respectivamente). Todos os outros grupos são discriminados adequadamente pelo sistema de medição.

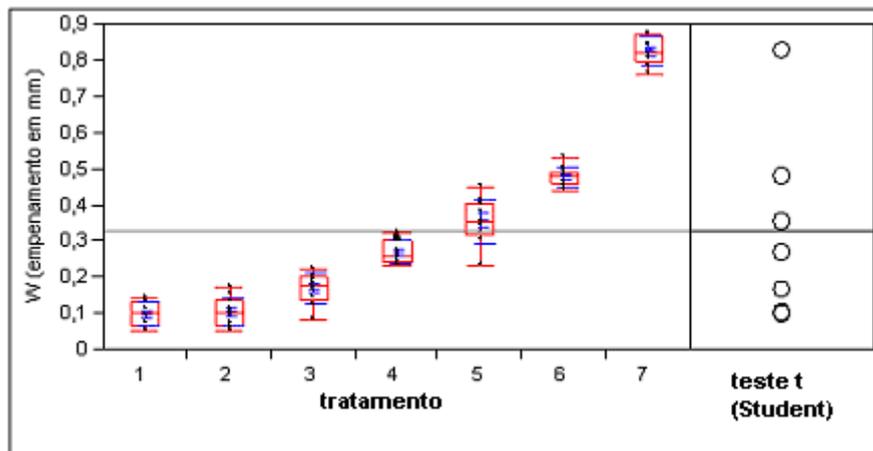


Figura 7 – Avaliação estatística dos dados experimentais

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

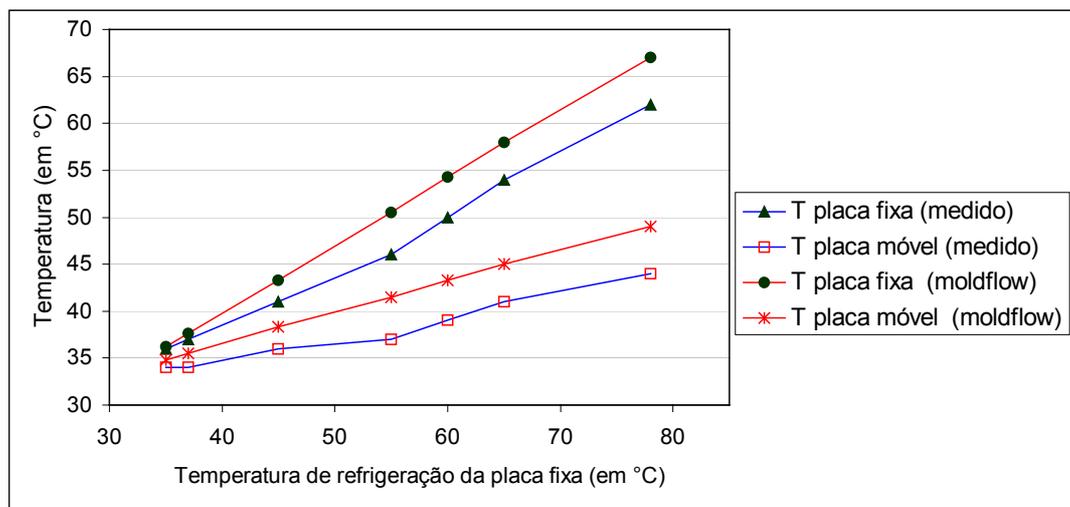


Figura 8 – Comparação das temperaturas obtidas experimentalmente e por simulação

A construção de um gráfico do empenamento x diferença de temperatura entre placas do molde, mostrada na Figura 9, evidencia um crescimento linear e diretamente proporcional conforme citado por Akay, Ozden e Tansey⁽⁷⁾ para a curva gerada pelo aplicativo e 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, Ozden e Tansey⁽⁷⁾ e Newman.⁽¹⁰⁾ 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.

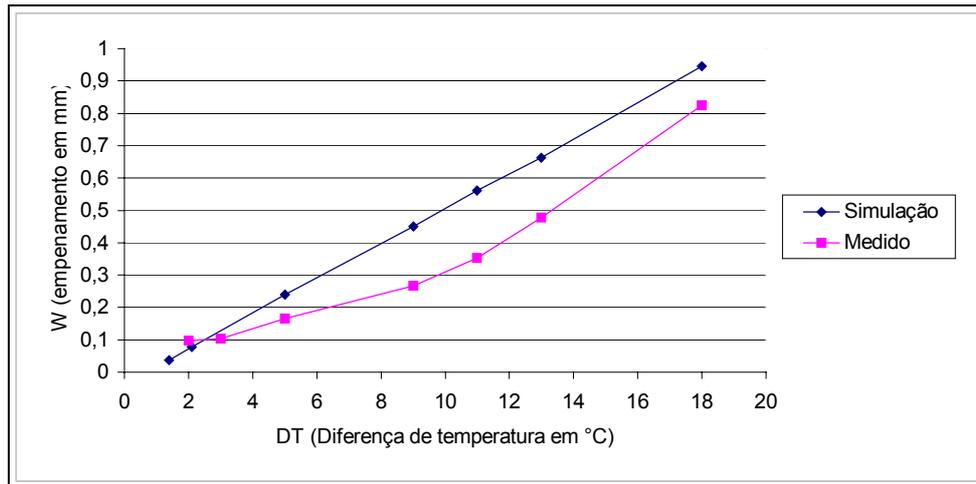


Figura 9 – Empenamento x diferença de temperatura entre as placas do molde

Utilizando o aplicativo estatístico JMP 5.1 (14) 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 o diferencial de temperatura entre os moldes.

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. O empenamento 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

- 1 FISCHER, Jerry M. - Handbook of molded part shrinkage and warpage. lastics Design Library , p. 252, 2002.
- 2 POPPE ,E. A., LEIDIG, Karl; SCHIRMER, Karl and WILKINSON ,R. - The"Top Ten" Moulding Problems. Disponível em: http://plastics.dupont.com/myplastics/Mediator?id=537&locale=en_US. Acesso em: 08/01/2007.
- 3 CHOI, Du-Soon, M, Yong-Taek - Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding. Composite structures , v. 47 , p.655-665, 1999.
- 4 ZOETLIEF, W. F., DOUVEN, L. F. A., HOUSZ, A. J. Ingen - Residual thermal stresses in injection molded products. Polymer engineering and science, v. 36, n.14, 1996.
- 5 LIU, Shih-Jung - Modeling and simulation of thermally induced stress end warpage in injection molded thermoplastics. Polymer engineering and science, v. 36, n.6, 1996.
- 6 GU, Yuanxian, LI, Haimei, CHANGYU, Shen - Numerical simulation of thermally induced stress and warpage in injection molded thermoplastics. Advances in polymer technology technology, v. 20, n. 1, 2001.
- 7 AKAY, M., OZDEN, S., TANSEY, Tony- Prediction of process-induced Warpage in injection molded termoplastics. Polymer engineering and science, v. 36, n. 13, 1996.
- 8 LIAO, S.J.; CHANG, D.Y., CHEN, H.J., TSOU, L.S., HO, J.R., YAU, H.T., HSIEH, W.H., WANG, James T., SU, Y.C. – Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts. Polymer engineering and science, v. 44, n.5, mai. 2004.
- 9 KRAMSCHUSTER, Adam, CAVITT, Ryan, ERMER, Donald, CHEN, Zhongbao, TURNG, Lih-Sheng – Quantitative study of shrinkage and warpage behaviour for microcellular and conventional injection molding. Polymer engineering and science, ago. 2005.
- 10 NEWMAN, Robert - Moldflow plastics Insight 3.0 thermoplastic material Properties database. Flowfront Magazine. Disponível em: www.moldflow.com/flowfront/0109/columns/poly//0109poly.htm Acesso em: 06/01/2007
- 11 Basf–Características de material. Disponível em: www.materialdatacenter.com/cwv/matdb/matdb.php Acesso em: 15/12/2006.
- 12 Moldflow Plastics Insight 6.0, Licença Whirlpool Corporation.
- 13 Battenfeldt – Características da máquina de injeção. Disponível em: www.sms-k.com/SMS_Startframe/SGT-Startframe_engl/PDFFiles/pdfs_new_june_2005/machines/Plus_e.pdf. Acesso em: 10/12/2006.
- 14 Aplicativo estatístico JMP 5.1 - A BUSINESS UNIT OF SAS Copyright © 1989-2003 SAS Institute Inc. All rights reserved., Licença Whirlpool Corporation.