

# INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO SOBRE A TENSÃO RESIDUAL NA SUPERFÍCIE DE PEÇAS INJETADAS<sup>1</sup>

*Eric Hisao Murakami<sup>2</sup>  
Ricardo Pedro Bom<sup>3</sup>*

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência dos parâmetros do processo de moldagem por injeção para se obter uma tensão residual mínima na superfície de peças injetadas. Nesse estudo foram realizadas simulações de injeção no aplicativo comercial MPI 5.0 com diferentes condições de processo, onde um dos resultados analisados foi a tensão residual na superfície. Foram realizadas moldagens por injeção de corpos de prova em quatro situações de processo semelhantes às simuladas. Para o desenvolvimento experimental foi utilizado o copolímero ABS. Os corpos de prova injetados foram imersos em ácido acético glacial durante dois minutos, depois as superfícies foram caracterizadas por microscopia ótica e eletrônica. Foi realizada uma análise de significância estatística a partir de alguns parâmetros de processo com um experimento “Central Composite Design”. Pôde-se identificar as posições dos parâmetros de injeção em um gráfico. Foi determinado que existe uma relação coerente entre os resultados obtidos por meio de simulação e os obtidos experimentalmente, e que a análise estatística permite prever e identificar diferentes parâmetros de processo que resultam em tensões residuais semelhantes.

**Palavras-chave:** Tensão residual superficial; Ácido acético glacial; Injeção; DOE.

## **PROCESS PARAMETERS INFLUENCE ON RESIDUAL STRESS ON INJECTED PARTS SURFACE**

### **Abstract**

The aim of this work was to analyse the influence of the injection molding process parameters to achieve least possible residual stress on the surface of specimens. In this study, injection simulations were carried out on MPI 5.0 commercial software with different process conditions, where one of the results analysed was the superficial residual stress. Moldings by injection of specimens were done in four process conditions similar to the simulated ones. An ABS copolymer was used for the experimental development. The specimens were immersed in glacial acetic acid during two minutes, subsequently the analysis of the surfaces was carried out using optical and electronical microscopy. An analysis of statistical significance was carried out using some process parameters with a “Central Composite Design” experiment. It was possible to identify the parameters positions graphic. It was determined that a coherent relation exists between the results obtained through simulation and the experimentally obtained ones, and that the statistical analysis allows to predict and to identify different parameters of process that result in similar residual stresses.

**Key words:** Superficial residual stress; Glacial acetic acid; Injection; Design of experiments.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Mestrando em Eng. de Materiais, UDESC-CCT / Joinville*

<sup>3</sup> *Prof. Dr. Eng., UDESC-CCT / Joinville.*

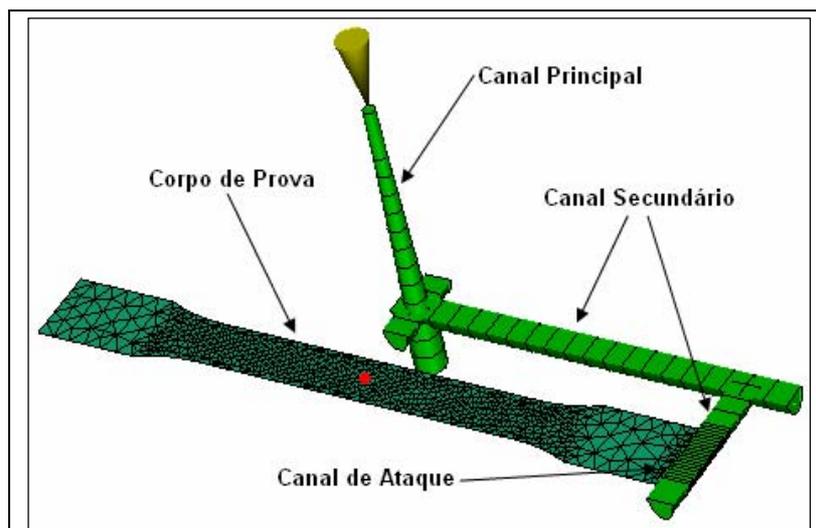
## 1 INTRODUÇÃO

Tensões residuais em polímeros, desenvolvidas durante o processo de injeção, podem causar deformações e até mesmo a ruptura de peças quando submetidas à influência de ambientes específicos oriundos das diversas aplicações para peças plásticas. Em baixas magnitudes de tensões residuais ( $\ll$  tensão de ruptura), macro-alterações dimensionais assim como ruptura em peças dificilmente ocorrem, mas pequenas fraturas e micro-deformações podem ocorrer em camadas de materiais muito próximas à superfície ( $<50\mu\text{m}$ ).<sup>[1]</sup> Quando a tensão residual é expressiva, podem ocorrer empenamentos, trincas e fraturas importantes na peça.<sup>[2]</sup> No caso de peças injetadas em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e que passam posteriormente, por um processo de cromagem (metalização + eletro galvanização), o estado das tensões na superfície é um dos fatores mais importantes, causando influência direta na qualidade da união polímero-metal. A ocorrência de fraturas e micro-deformações na superfície de uma peça não necessariamente acontecerá logo após o processo de injeção e/ou galvanização, poderá ocorrer quando a mesma estiver sobre a influência de ambientes desfavoráveis como solventes, alta temperatura, banho químico, etc. Para o controle da tensão residual superficial em peças injetadas em ABS, é necessário quantificar as tensões, conhecer a influência dos parâmetros de injeção e identificar níveis de tensões que não afetem o desempenho das peças em campo. Diversos estudos têm sido feitos com o propósito de quantificar as tensões residuais de polímeros processados por injeção: *layer removal*,<sup>[3]</sup> *hole-drilling*<sup>[4]</sup> os quais não servem para medir tensões muito próximas a superfície.<sup>[1]</sup> Uma técnica que consegue identificar níveis de tensões na superfície é o chemical probe,<sup>[5]</sup> onde relações entre tensão e deformações/trincas para diferentes combinações polímero-ambiente agressor são estudadas a fim de comparar tais resultados com valores de referência. Para o ABS, o ambiente agressor em questão é o ácido acético glacial.<sup>[6]</sup> No presente estudo, foram realizadas simulações em um aplicativo comercial, possibilitando analisar e quantificar as influências de parâmetros de injeção sobre tensões residuais superficiais. Tais valores serviram de referência para comparação com resultados obtidos experimentalmente a partir da injeção de corpos de prova e posterior ataque com ácido acético.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Simulação

Para o desenvolvimento deste trabalho de simulação foram utilizadas as propriedades de um polímero termoplástico de estrutura amorfa, o ABS grade GG-22 da Basf. Na Figura 1, está representado o modelo de elementos finitos utilizado para realizar as simulações do processo de injeção. A peça analisada é um corpo de prova (CP) de ensaio de tração, formato ASTM D 638, tipo I. A simulação do processo de injeção foi realizada com o aplicativo MPI 5.0<sup>[11]</sup> e foram executadas 27 simulações para avaliar as variações da tensão residual na superfície.



**Figura 1** – Modelo de elementos finitos para a casca média do corpo de prova com os canais de distribuição.

## 2.2 Análise Estatística

A partir da análise estatística dos resultados simulados foram analisadas as influências de cinco parâmetros de injeção, assim como as interações entre os mesmos, sobre a tensão residual na superfície do corpo de prova. O ponto no qual os valores de tensões foram determinados é o ponto central do corpo de prova, indicado pelo círculo vermelho na Figura 1. A Tabela 1 mostra os cinco parâmetros de processo escolhidos assim como os respectivos limites. Em estatística, os parâmetros são chamados de fatores e os limites de níveis.

**Tabela 1** – Fatores e Níveis

Parâmetros (Fatores)	Limites (Níveis)	
	Inferior	Superior
Tempo de injeção (s)	1	24
Temperatura do molde (°C)	40	60
Temperatura de injeção (°C)	220	270
Pressão de recalque (MPa)	30	90
Tempo de recalque (s)	7	15

Primeiramente foi realizado um experimento fatorial  $2^k$  onde se concluiu que as interações entre os fatores são importantes. De acordo com Montgomery,<sup>[7]</sup> o experimento fatorial  $2^k$  não é capaz de representar curvaturas na superfície de resposta, já o experimento fatorial  $3^k$  consegue, entretanto, o experimento mais eficiente para tal abordagem é o experimento  $2^k$  com adição de pontos axiais, conhecido como *Central Composite Design*.

## 2.3 Experimento

Para injeção dos corpos de prova, foi utilizado como matéria-prima o copolímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS) Tairilac-AG-12AO, o qual foi secado em estufa à 80°C durante oito horas antes do processamento. A máquina de injeção utilizada foi da marca Battenfeld modelo 250 plus com as seguintes características: rosca de 22mm de diâmetro, capacidade de injeção de 34,5g de PS e força de fechamento de 25t.

Para identificação dos níveis de tensão residual na superfície das peças injetadas foi utilizado ácido acético glacial com 99% de pureza. Foi realizado o seguinte procedimento experimental: imersão no ácido por 2 minutos a temperatura ambiente, lavagem em água corrente, secagem com jato de ar comprimido e posterior análise em microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura com aumentos de 200 vezes.

### 3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Análise Estatística – DOE

A Tabela 2 apresenta o planejamento do experimento  $2^{(5-1)}$  *Central Composite Design* com 27 configurações, assim como com os respectivos valores das tensões residuais resultantes da simulação.

**Tabela 2** – Planejamento do DOE

Configurações	$2^{(5-1)}$ Central Composite – 27 configurações					
	Tempo de Injeção (s)	Temperatura de Injeção (°C)	Temperatura do Molde (°C)	Pressão de Recalque (MPa)	Tempo de Recalque (s)	Tensão Residual (MPa)
1	0,5	220	40	30	15	41,24
2	0,5	220	40	90	7	29,54
3	0,5	220	60	30	7	41,28
4	0,5	220	60	90	15	29,44
5	0,5	270	40	30	7	37,07
6	0,5	270	40	90	15	26,62
7	0,5	270	60	30	15	35,77
8	0,5	270	60	90	7	41,18
9	20,0	220	40	30	7	30,12
10	20,0	220	40	90	15	19,81
11	20,0	220	60	30	15	30,10
12	20,0	220	60	90	7	19,81
13	20,0	270	40	30	15	25,92
14	20,0	270	40	90	7	15,12
15	20,0	270	60	30	7	25,96
16	20,0	270	60	90	15	15,10
17	0,5	245	50	60	11	31,74
18	20,0	245	50	60	11	21,66
19	10,0	220	50	60	11	28,15
20	10,0	270	50	60	11	22,43
21	10,0	245	40	60	11	24,27
22	10,0	245	60	60	11	24,27
23	10,0	245	50	30	11	32,81
24	10,0	245	50	90	11	20,25
25	10,0	245	50	60	7	24,28
26	10,0	245	50	60	15	24,25
27	10,0	245	50	60	11	24,27

Na análise de variâncias indicada pela Tabela 3, pode-se inferir que, a nível de significância de 0,05 (significando que a probabilidade aceitável de errar é menor ou igual a 5% [7]), todos os fatores e suas interações influenciam ( $p < 0,05$ ) no resultado da tensão residual superficial. Nota-se que a temperatura do molde é o fator que apresentou maior probabilidade ao erro ( $p \approx 0,061$ ).

**Tabela 3 – Análise de Variâncias (ANOVA)**

Fator	SS	df	MS	F	p
(1)Tempo de Injeção(L)	675,65	1	675,65	322,07	2,4E-8
Tempo de Injeção(Q)	20,43	1	20,43	9,74	0,012
(2)Temperatura de Injeção(L)	33,00	1	33,00	15,73	0,003
(3)Temperatura do Molde(L)	9,62	1	9,62	4,58	0,061
(4)Pressão de Recalque(L)	386,82	1	386,82	184,39	2,7E-7
Pressão de Recalque(Q)	15,39	1	15,39	7,34	0,024
(5)Tempo de Recalque(L)	14,33	1	14,33	6,83	0,028
Interação entre (1)(L) e (2)(L)	17,64	1	17,64	8,41	0,018
Interação entre (1)(L) e (3)(L)	10,83	1	10,83	5,16	0,049
Interação entre (1)(L) e (4)(L)	11,55	1	11,55	5,51	0,044
Interação entre (1)(L) e (5)(L)	15,75	1	15,75	7,51	0,023
Interação entre (2)(L) e (3)(L)	11,16	1	11,16	5,32	0,047
Interação entre (2)(L) e (4)(L)	19,01	1	19,01	9,06	0,015
Interação entre (2)(L) e (5)(L)	15,52	1	15,52	7,40	0,024
Interação entre (3)(L) e (4)(L)	15,37	1	15,37	7,32	0,024
Interação entre (3)(L) e (5)(L)	23,91	1	23,91	11,40	0,008
Interação entre (4)(L) e (5)(L)	11,02	1	11,02	5,25	0,048
Erro	18,88	9	2,10		
SS Total	1389,48	26			

Obs.: (L) = Termo Linear, modela uma função polinomial de primeira ordem; (Q) = Termo Quadrático, modela uma função polinomial de segunda ordem.

Onde, segundo Montgomery,<sup>[7]</sup> os termos das colunas da Tabela 3 são definidos como segue:

- Fator: variável independente, sendo responsável ou não pelo comportamento da variável resposta, que neste caso é a *tensão residual superficial*. Obs.: 1L por 2L = interação entre os fatores (1)(L) e (2)(L);
- SS: soma dos quadrados dos tratamentos ;
- df: grau de liberdade de cada fator;
- MS: média dos quadrados dos tratamentos;
- F: razão entre a média dos quadrados dos tratamentos e a média dos quadrados dos erros;
- p: probabilidade em errar ao considerar que um fator influencia no comportamento da variável resposta.

Os termos acima foram calculados com o uso do software STATISTICA 7.1<sup>[12]</sup> a partir do tratamento dos dados de entrada representados pela Tabela 2.

Para validação dos resultados, foram realizadas análises de normalidade e de aleatoriedade dos resíduos (desvios da média) da variável dependente, a tensão residual superficial.

O gráfico (a) da Figura 2 confirma a hipótese de distribuição normal da variável dependente, onde os valores dos resíduos estão sobre ou próximos a linha, que indica a distribuição normal perfeita. Já o gráfico (b) da Figura 2 indica uma boa aleatoriedade dos resíduos (distribuição uniforme dos valores acima e abaixo do eixo  $x = 0$ ), validando a análise de variâncias realizada anteriormente.

Com quatro gráficos do tipo superfície de resposta, pode-se identificar qual é a tendência do comportamento ideal para que cada um dos 5 fatores impliquem em baixos níveis de tensões residuais.

Os gráficos apresentados na Figura 3 (3a,3b,3c e 3d) foram realizados no aplicativo STATISTICA 7.1,<sup>[12]</sup> onde os parâmetros de entrada foram os valores indicados na Tabela 2. Nesta análise procura-se obter uma tensão residual mínima para o corpo de prova injetado.

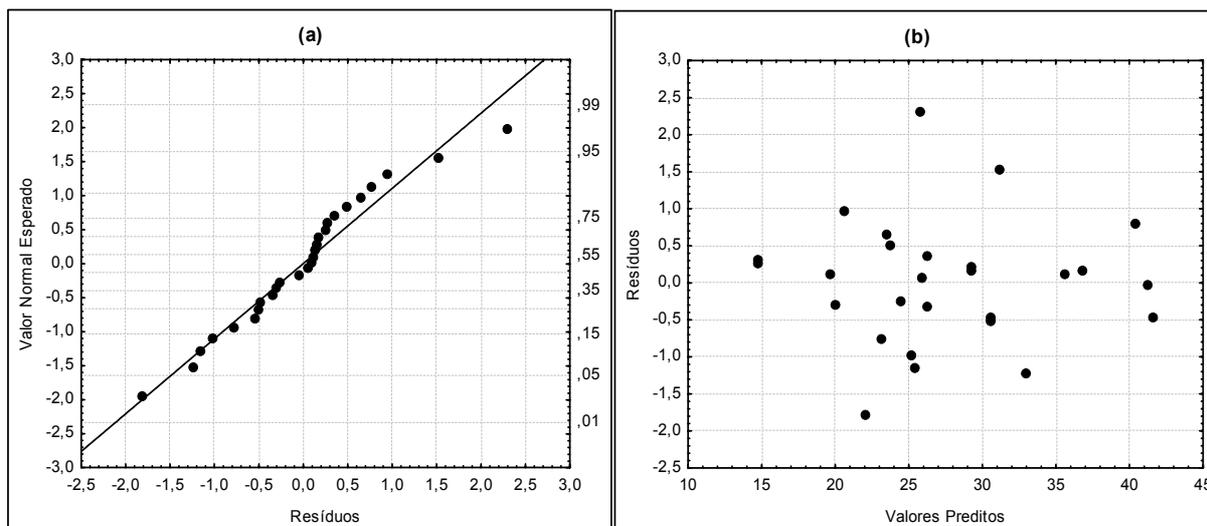


Figura 2 – a) Gráfico de probabilidade normal; b) Gráfico de análise de aleatoriedade dos resíduos

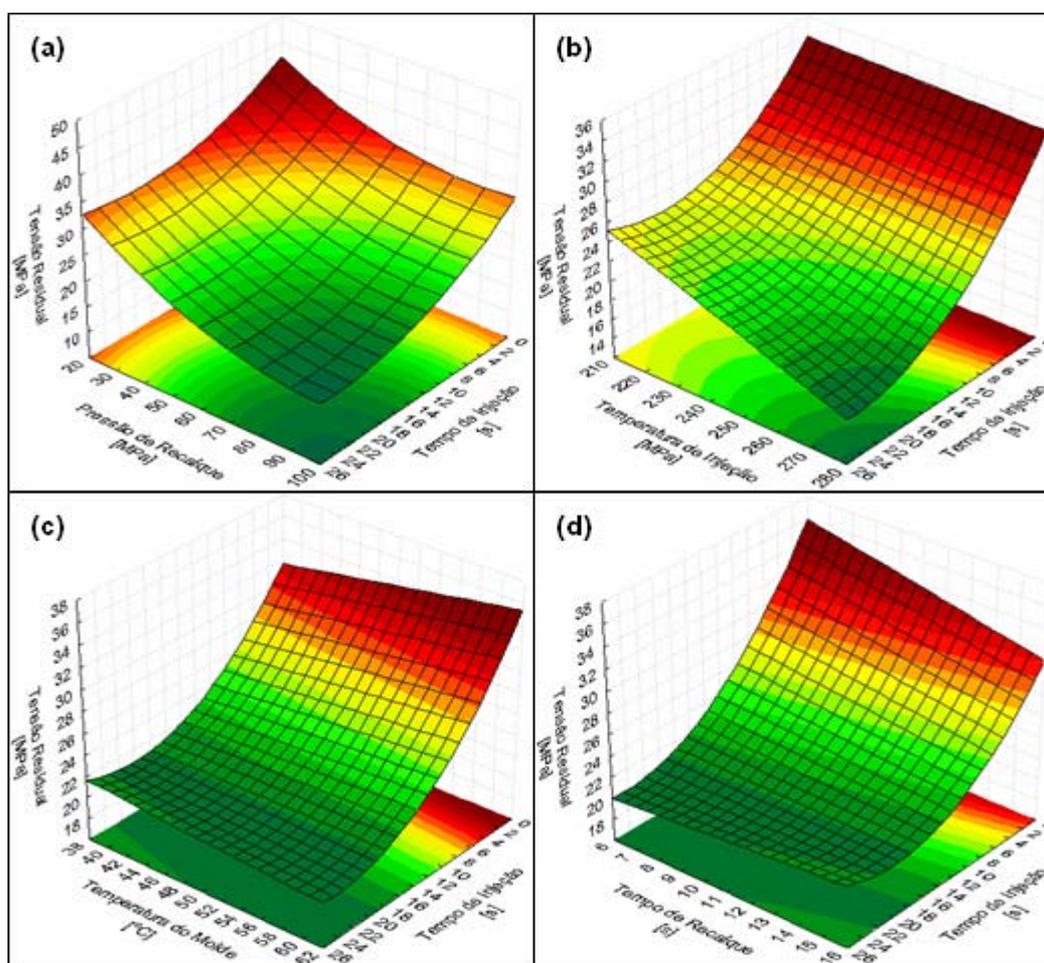


Figura 3 – Gráficos tipo superfície de resposta dos seguintes parâmetros: Tensão Residual, Tempo e Temperatura de Injeção, Pressão de Recalque, Temperatura do molde e Tempo de Recalque.

Um dos resultados desta análise pode ser visto nos gráficos 3a e 3b. Onde se pode concluir que para se obter uma tensão residual menor para o CP utilizado é necessário aumentar o tempo de injeção, pressão de recalque e a temperatura de

injeção. No gráfico 3c, para se obter a menor tensão residual é necessário aumentar a temperatura de injeção e diminuir a temperatura do molde. No gráfico 3d, foi analisado o tempo de injeção e o tempo de recalque, este último parâmetro de processo não teve um grande efeito na tensão residual final mínima.

### 3.2 Processos de Injeção e Imersão em Ácido Acético Glacial

A Tabela 4 mostra os parâmetros utilizados nas injeções de corpos de prova com 4 configurações distintas, assim como os valores de tensão residual superficial encontrados por meio de simulação do processo de injeção e a classificação do nível de tensão residual avaliado pela seqüência: imersão em ácido acético glacial e análise em microscopias óptica e eletrônica de varredura. Inicialmente, os níveis de tensão residual foram classificados como “com tensão” e “sem tensão”.

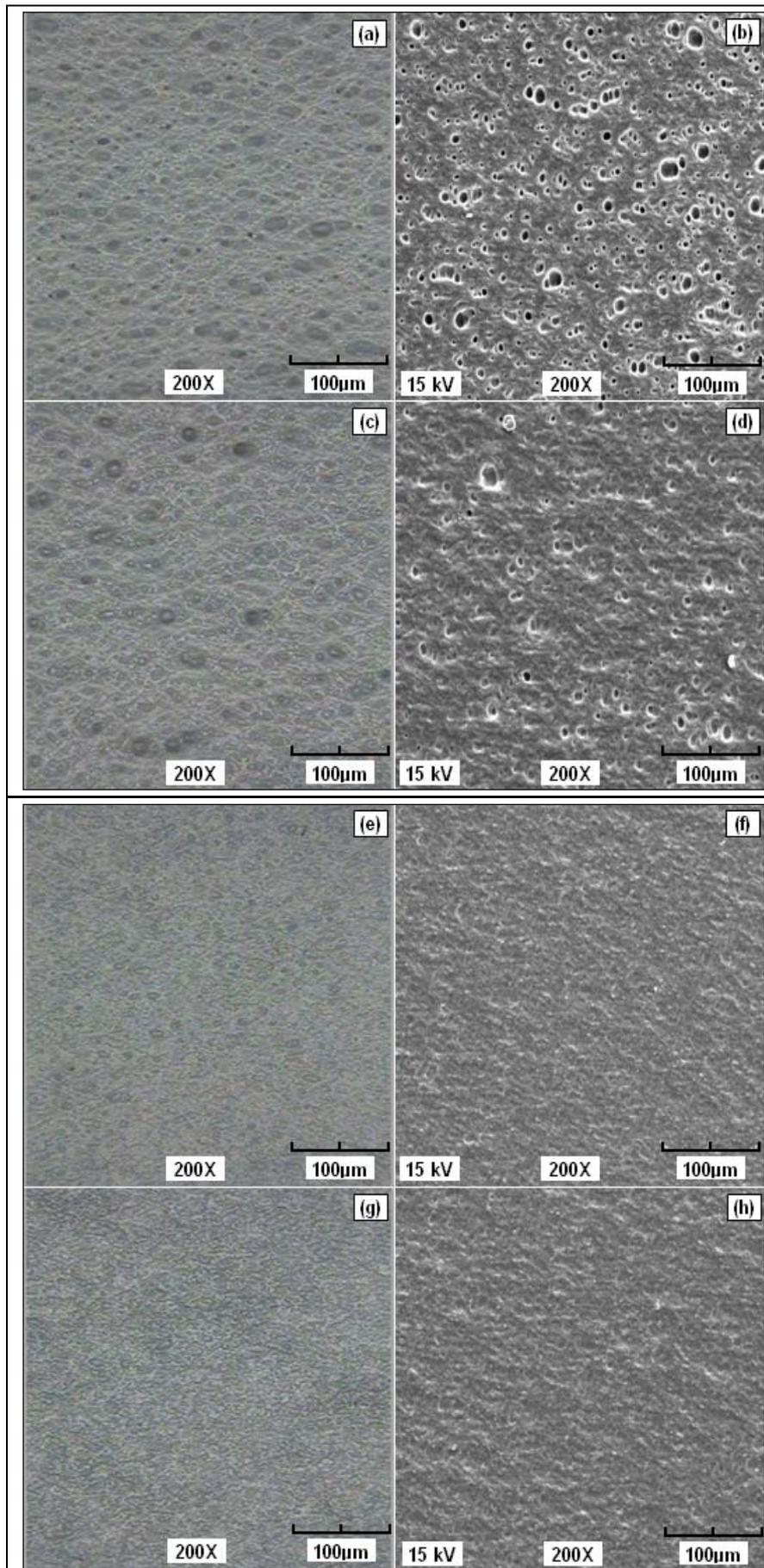
**Tabela 4** – Parâmetros utilizados no processo de injeção

<b>Número Amostra</b>	1	6	12	24
Tempo de injeção [s]	1	6	12	24
Temperatura de Injeção [°C]	240	240	240	240
Temperatura do Molde [°C]	52	49	48	51
Pressão de Recalque [MPa]	47,2	35,8	37,4	39
Tempo de Recalque [s]	10	10	10	10
Tensão Residual [MPa]	34,23	33,09	30,43	26,35
Nível de Ataque em Ácido Acético	Com Tensão	Com Tensão	Sem Tensão	Sem Tensão

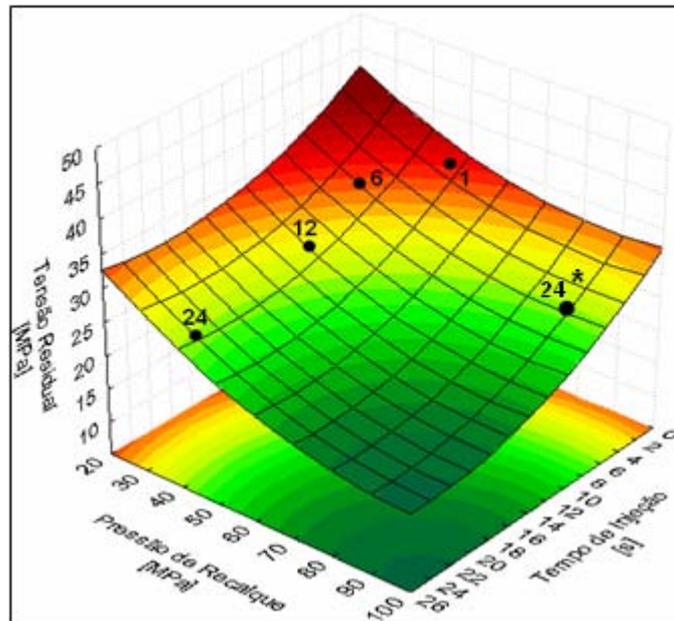
Para cada um dos quatro parâmetros acima, 5 corpos de prova foram utilizados no experimento de imersão em ácido acético glacial. As superfícies das 20 peças foram analisadas em microscopia óptica e eletrônica de varredura com aumento de 200 vezes. Seguem abaixo apresentadas na Figura 4, imagens representativas de cada parâmetro, sendo microscopia óptica à esquerda (4a, 4c, 4e e 4g) e MEV à direita (4b, 4d, 4f, 4h). A direção do fluxo de preenchimento do polímero no interior da cavidade do molde em relação às imagens 4a a 4h é vertical.

Considerando que superfícies com maior nível de degradação estão mais tensionadas, verifica-se um maior tensionamento na amostra 1. A amostra 6 apresenta menor tensionamento que a amostra 1, mas maior nível de tensão que nas amostras 12 e 24. Entretanto, é difícil analisar qual das amostras, 12 ou 24, está mais tensionada. Confrontando as Figuras 4e e 4g, diz-se que a amostra 12 está levemente mais danificada que a amostra 24, o que não é possível concluir sopesando as Figuras 4f e 4h.

Os parâmetros temperatura de injeção e tempo de recalque foram mantidos constantes na injeção das amostras 1, 6, 12 e 24. Além disso, como a temperatura do molde variou pouco, estabilizando em torno de 50°C, e como sua influência sobre a tensão residual é pequena diante dos outros fatores, as condições das 4 amostras foram representadas em um gráfico superfície de resposta com 2 variáveis independentes (tempo de injeção e pressão de recalque) e uma variável resposta (tensão residual superficial) considerando as outras 3 variáveis (temperatura de injeção, temperatura do molde e tempo de recalque) constantes como indicado pela Figura 5 abaixo.



**Figura 4** – a e b: Amostra 1; c e d: Amostra 6; e e f: Amostra 12; g e h: Amostra 24.



**Figura 5** – Simulação + DOE + Experimental

Uma informação relevante que se obteve deste gráfico é que através das técnicas de simulação e análise estatística, pode-se auferir superfícies com baixa tensão residual, ou seja, semelhantes ao experimento 24 mas com tempos de injeção menores, trabalhando com altas pressões de recalque: ponto 24\*, com pressão de recalque de 90MPa, tempo de injeção de 6s e tensão residual de 26MPa.

#### 4 CONCLUSÃO

Pode-se inferir que, para valores mínimos de tensão residual nas superfícies de peças injetadas em ABS, o processo de injeção deve ser ajustado para altos tempos de injeção, altas pressões de recalque, altas temperaturas de injeção e baixas temperaturas do molde. O tempo de recalque não demonstrou ser significativo sobre as tensões residuais superficiais, entretanto, deve-se utilizar um tempo mínimo para obter a solidificação efetiva do canal de ataque.

Verificou-se que a superfície modelada utilizando simulação e meios estatísticos apresentam coerência com os resultados qualitativos encontrados via moldagem por injeção e posterior ataque em ácido acético. Valores de tensão residual máxima podem ser definidos a partir de tal correlação. Com tal limiar estabelecido, uma otimização resultaria em níveis aceitáveis de tensões residuais na superfície de peças injetadas em ABS variando os parâmetros de injeção objetivando, por exemplo, o menor tempo de injeção possível.

As técnicas apresentadas neste trabalho mostraram-se eficientes perante as técnicas existentes de medição de tensão residual em polímeros injetados, as quais apresentam grande dificuldade em medir tensões em profundidades muito próximas a superfície (<50 $\mu$ m).

## REFERÊNCIAS

- 1 A. Turnbull, A. S. Maxwell, S. Pillai, "Residual stress in polymers—evaluation of measurement techniques" *Journal Of Materials Science* 34, p. 451– 459 (1999).
- 2 Jeffrey A. Jansen, Stork Technimet, "Environmental stress cracking – examples from the automotive industry".
- 3 C. S . HINDLE, J . R. WHITE, D. DAWSON and K. THOMAS, "Polymer Engineering and Science", 32 (1992), p. 157.
- 4 Turnbull A., Maxwell A.S., "Measurement of residual stress in engineering plastics using the hole-drilling technique".
- 5 Turnbull A., Maxwell A.S., "Characterisation of Environment Stress Cracking Susceptibility of Weldline Defects by the Chemical Probe Technique"
- 6 ASTM D 1939-84: "Determining residual stress in extruded or molded acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) parts by immersion in glacial acetic acid".
- 7 Douglas C. Montgomery. "Design and Analysis of Experiments". 5th Edition, John Wiley and Sons. New York (2001).
- 8 Daly, H., Nguyen, K., Sanschagrin, B. & Cole, K. (1998). "The build-up and measurement of molecular orientation, crystalline morphology, and residual stresses in injection molded parts: a review". *J Injection Molding Tech*, 2, p. 59-85.
- 9 J Lu, M James and G Roy, "Handbook of Measurement of Residual Stresses", ISBN 0-88173-229-X (1996).
- 10 D W Borland, "Residual stress measurement – Methods, limitations and significance", *Proc. 2nd Australian Int. Conf. Surface Engineering*, Adelaide, March 1994, p. 114-121.[Also published in *Quality Control and Assurance in Advanced Surface Engineering*, Inst of Materials, 1997, p. 113-125.
- 11 Aplicativo Moldflow Plastic Inside MPI, versão 5.0
- 12 Aplicativo STATISTICA versão 7.1