



## ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DE MACHOS DE INJEÇÃO DE PVC FABRICADOS EM FERRO FUNDIDO BRANCO E AÇO H13 SUBMETIDO A TRÊS TIPOS DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

**Roberto M. Souza<sup>1</sup>, Alexandre Martins<sup>2</sup>, Amilton Sinatora<sup>3</sup>**

Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

(1) [rsouza\\_csm@hotmail.com](mailto:rsouza_csm@hotmail.com), (2) [Martinsa@usp.br](mailto:Martinsa@usp.br), (3) [sinatora@usp.br](mailto:sinatora@usp.br) - São Paulo, SP, Brasil

**Andre P.P. Silveira**

Astra S.A.

[dpr@astra-sa.com.br](mailto:dpr@astra-sa.com.br) - Jundiaí, SP, Brasil

**Resumo.** Este trabalho apresenta um estudo desenvolvido para comparação do desempenho ao desgaste de quatro materiais selecionados para machos utilizados durante a injeção de policloreto de vinila (PVC). Um total de dezesseis machos foi montado em uma injetora e colocado em condições reais de produção. Quatro deles foram fabricados em ferro fundido branco de alto cromo e os demais em aço ferramenta H13 submetido a três tipos distintos de tratamento superficial. Quatro amostras de aço H13 foram nitretadas a gás, quatro foram revestidas com nitreto de cromo (CrN) e quatro foram revestidas com nitreto de titânio (TiN). O estudo comparativo foi baseado em análises realizadas durante paradas do ciclo produtivo, nas quais as amostras foram extraídas da máquina de injeção e caracterizadas quanto à perda de massa e rugosidade e analisadas por microscopia óptica. A perda de volume durante o processo foi estimada com base na perda de massa. Os resultados obtidos indicaram que, para a aplicação selecionada, os machos fabricados em ferro fundido branco de alto cromo foram os que tiveram desempenho superior, seguidos por aqueles fabricados em aço H13 com revestimento de CrN, os com revestimento de TiN e, por último, o material nitretado.

**Palavras-chave:** Desgaste, Injeção, Polímeros, Tratamentos Superficiais, Ferro Fundido Branco

### 1. INTRODUÇÃO

A fabricação de peças de material polimérico está, por muitas vezes, associada ao uso de máquinas de injeção, nas quais o material inicialmente granulado passa por um processo de aquecimento e fusão à medida que é movimentado ao longo de uma rosca. Este deslocamento relativo do material polimérico em relação aos componentes da máquina está associado ao desgaste dos mesmos e, dependendo da intensidade, este desgaste pode periodicamente resultar na necessidade de reparo ou substituição dos componentes. Da mesma forma, os

moldes utilizados na confecção das peças igualmente ficam submetidos ao movimento relativo do material polimérico, o que pode causar o desgaste das cavidades durante o preenchimento.

Nos últimos anos, algumas tentativas foram feitas para se entender melhor o desgaste que ocorre durante a manufatura de peças plásticas por injeção, com ênfase para o estudo dos efeitos da movimentação do material polimérico ao longo da rosca da injetora. Exemplos destes estudos podem ser encontrados nos trabalhos de Bull *et al.* (2000), Heinze *et al.* (1995) e Heinze (1995). Particularmente nos últimos dois casos, o problema foi dividido em dois e separou-se as condições iniciais, onde o material encontra-se basicamente na forma granulada, daquelas encontradas ao final da rosca, onde o material encontra-se completamente fundido. Os resultados obtidos indicaram que o desgaste observado na etapa inicial está basicamente associado ao mecanismo de abrasão, enquanto que, na outra extremidade da rosca, as características do fluxo do material polimérico resultam em uma condição onde abrasão e corrosão agem conjuntamente e sinergisticamente. Nos estudos apresentados por Heinze *et al.* (1995) e Heinze (1998), dois equipamentos distintos foram projetados e selecionados para se entender o comportamento tribológico em cada um dos dois casos, bem como estudou-se a viabilidade de alterar-se o tratamento superficial do material das roscas para se obter opções onde a necessidade das paradas para reparo ou substituição de componentes fosse diminuída. Mais recentemente, outro equipamento foi desenvolvido por Bull *et al.* (2000) como alternativa para estudo do comportamento tribológico observado durante a movimentação do material polimérico ao longo da rosca de injeção e mais uma vez estudou-se diferentes tratamentos superficiais para minimização do desgaste dos componentes.

Pelas características do processo, é de se esperar que as condições presentes durante o preenchimento dos moldes de injeção sejam próximas das encontradas no final da rosca. Por outro lado, as restrições impostas ao movimento relativo em determinadas regiões podem gerar condições tribológicas específicas nestes casos. Mais uma vez, alguns equipamentos, como o descrito por Frisenbichler *et al.* (1999), foram desenvolvidos para simular as solicitações características do desgaste de moldes de injeção. Da mesma forma, diferentes tratamentos foram estudados, por exemplo por Devos *et al.* (1999), para a superfície de machos de injeção, ou ainda por Dearnley (1999) para o estudo do atrito durante a extração da peça injetada.

Neste trabalho, aprofundou-se os estudos desenvolvidos em conjunto pela ASTRA S.A. e o programa de Redes Cooperativas de Pesquisa (RECOPE) da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), cujos resultados iniciais foram divulgados por Silveira (1999) e por Silveira *et al.* (2000). Para tanto, machos utilizados na injeção de material polimérico foram fabricados com quatro diferentes características, seja de tipo de material ou de tratamento superficial, e o comportamento ao desgaste de cada uma destas características foi estudado colocando-se estes materiais simultaneamente em condições reais de produção, seguida de análises de perda de volume, rugosidade superficial e microscopia óptica.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Um molde com dezesseis cavidades iguais e balanceado foi selecionado para as experiências em condições reais de produção. Cada uma das cavidades continha um macho com dimensões mostradas na Fig. 1, os quais, em função do molde selecionado, ficaram submetidos a condições tribológicas muito semelhantes durante a produção. Durante a operação, os moldes foram preenchidos com policloreto de vinila (PVC) sem a adição de nenhum tipo de carga, tal como fibra de vidro.

Quatro jogos de machos apresentando características diferentes em relação ao material e/ou tratamento superficial foram estudados. Quatro amostras foram fabricadas para cada um dos quatro jogos, os quais apresentaram as seguintes características:

- I – Um jogo de quatro machos fabricado em aço ferramenta AISI H13, que foram revestidos com nitreto de cromo (CrN) através de um processo comercial de deposição física de vapor (PVD). O processo de PVD resultou em camadas com espessura média de 10  $\mu\text{m}$ .
- II – Um jogo de quatro machos fabricado em aço ferramenta AISI H13, cuja superfície foi alterada através de processo comercial de nitretação a gás.
- III – Um jogo de quatro machos fabricados em aço ferramenta AISI H13, que foram revestidos com nitreto de titânio (TiN) através de um processo comercial de PVD, o qual resultou em camadas com espessura média de 4  $\mu\text{m}$ .
- A – Um jogo de quatro machos fabricados em ferro fundido branco de alto cromo e acabados em máquinas convencionais.

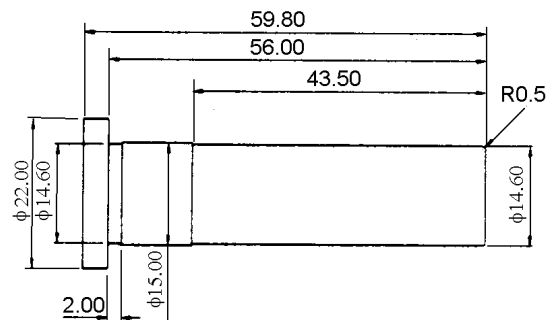


Figura 1: Desenho dos machos utilizados para análise da resistência ao desgaste durante processo de injeção de termoplásticos

O seguinte procedimento foi adotado para obtenção dos dados experimentais. Inicialmente, os machos foram montados em molde de injeção localizado na ASTRA S.A.. Em seguida, o molde foi colocado em máquina em situação normal de produção. Não foi autorizada a manutenção do referido ferramental, mesmo que necessário fosse. Ao final de um determinado número de ciclos de injeção, os machos foram enviados para análise quanto à perda de massa, rugosidade e microscopia. Posteriormente, os machos retornaram para a ASTRA S.A. para repetição deste procedimento. As análises foram realizadas ao final de 5.000, 23.000, 41.000, 59.000, 87.390 e 127.240 ciclos de injeção.

Durante as análises, as características superficiais de cada amostra foram observadas em microscópio óptico. A massa de cada amostra foi calculada com base na média aritmética de cinco medidas. As amostras, antes das pesagens, foram lavadas com detergente neutro, colocadas de quatro em quatro em um Becker com álcool e submetidas a oito minutos no ultra-som. Foram então secadas através de ventilação forçada e em seguida pesadas em uma balança analítica com resolução de 0,0001 g. A perda de volume das amostras foi estimada com base na densidade de cada um dos materiais. Para tanto, considerou-se a densidade do CrN como 6,2  $\text{g/cm}^3$ , do TiN como 5,1  $\text{g/cm}^3$  e do ferro fundido branco como 7,8  $\text{g/cm}^3$ . A densidade da superfície do material nitretado é mais difícil de ser estimada, já que a proporção entre os diferentes tipos de nitretos da camada nitretada não é facilmente identificada. Mesmo assim, em função das densidades dos nitretos obtidos com maior frequência, adotou-se o valor de 7,2  $\text{g/cm}^3$  para a densidade da superfície do material nitretado.

A rugosidade de cada macho foi determinada com base em quatro leituras, realizadas longitudinalmente e defasadas de 90°, como indicado na Fig. 2. Em seguida, fez-se a média aritmética das dezesseis medidas executadas para cada jogo para se estabelecer a rugosidade

média do jogo. O parâmetro de rugosidade medido foi o Ra, o qual representa a média aritmética dos picos dentro do comprimento de medição.

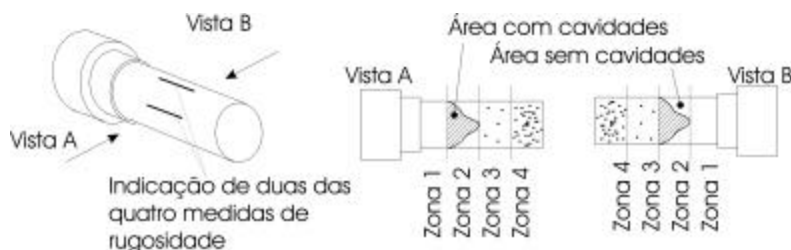


Figura 2: Esquema das características macroscópicas observadas em machos após 127.240 ciclos de injeção de PVC, juntamente com esquema indicativo das medidas de rugosidade

### 3. RESULTADOS

A Fig. 2 apresenta, ainda, um esquema com as principais características macroscópicas observadas nos machos ao final dos 127.240 ciclos de injeção. Em geral, foi possível observar o aparecimento de quatro zonas diferenciadas ao longo do comprimento que, por outro lado, não necessariamente apresentaram as mesmas características ao longo da circunferência, como indicado na Fig. 2. A Fig. 3 apresenta o aspecto destas zonas quando observadas no microscópio óptico. É importante notar que, apesar destas zonas terem aparecido em todas as amostras, a facilidade de diferenciação das mesmas, tanto no aspecto macroscópico quanto microscópico, não foi a mesma para todos os tipos de material/revestimento. Esta diferenciação foi mais facilmente identificada em amostras revestidas com CrN e TiN e menos pronunciada nas amostras nitretadas e fabricadas em ferro fundido branco de alto cromo.

A Fig. 3a apresenta as características da zona 1 (Fig. 2). Nota-se a presença de ranhuras na superfície, as quais estão associadas a riscos criados durante a usinagem do material. A Fig. 3a indica, ainda, riscos de abrasão ao longo da circunferência da amostra, os quais ocorreram em intervalos regulares, que devem estar associados aos picos dos riscos de usinagem.

A transição entre as zonas 1 e 2 pôde ser observada mesmo a olho nu, ou ainda utilizando-se a microscopia óptica (Fig. 3b). A Fig. 3b foi obtida com uma das amostras revestidas com CrN. Observando-se unicamente a zona 2, como na região à direita da Fig. 3b, nota-se que as mesmas não apresentam características unicamente associadas a mecanismos de abrasão, mas igualmente passam a apresentar pequenas cavidades distribuídas ao longo da superfície.

Seguindo-se na seqüência mostrada na Fig. 2, as Figs. 3c e 3d mostram as características da transição entre as zonas 2 e 3, neste caso em amostras que foram revestidas com CrN. Observando-se a zona 3 individualmente (Figs. 3c e 3d), nota-se que as cavidades presentes na zona 2, ainda que por vezes em número bem inferior, também aparecem nesta zona (Fig. 3c) mas, neste caso, observa-se também a presença de pequenos vazios distribuídos de forma não uniforme ao longo da circunferência desta zona (Fig. 3d). Além disso, em alguns casos, como no detalhe observado em uma amostra nitretada (Fig. 3e), nota-se que as pequenas cavidades podem ser mais pronunciadas em outros pontos da zona 3 e estão recobrendo defeitos ou riscos ocorridos anteriormente, provavelmente durante a extração da peça do molde durante uma das paradas anteriores para execução das análises.

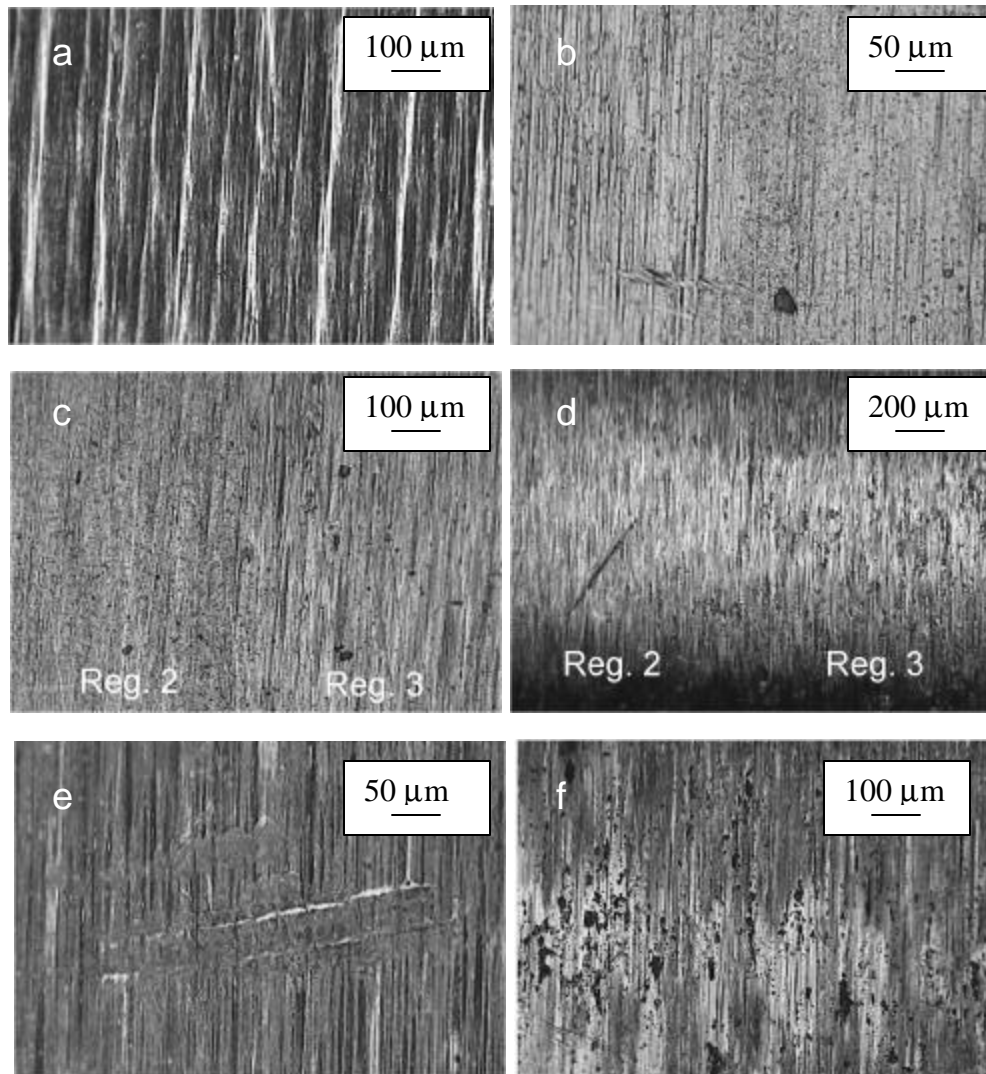


Figura 3: Microscopia óptica de machos após 127.240 ciclos de injeção de PVC: (a) Zona 1 de amostra em aço H13 nitretada a gás; (b) Tansição entre zonas 1 e 2 de amostra em aço H13 revestido com CrN; (c) Tansição entre zonas 2 e 3 de amostra em aço H13 revestido com CrN; (d) Tansição entre zonas 2 e 3 de amostra em aço H13 revestido com CrN; (e) Detalhe de zona 3 de amostra em aço H13 nitretada a gás e (f) Zona 4 de amostra em aço H13 revestido com CrN

Finalmente, na zona 4 observou-se características ligeiramente diferentes das observadas em zonas anteriores. Em particular, a quantidade de vazios observados nesta zona foi maior (Fig. 3f) que o observado na zona 3. Além disso, a olho nu pôde-se observar que o desgaste nesta zona foi mais acentuado que nas demais, o que ficou particularmente evidente nas amostras revestidas com TiN, já que o desgaste chegou ao ponto de retirar a camada de coloração dourada.

Analisando-se os diversos materiais/revestimentos, é importante repetir que as diferentes zonas foram observadas na maioria das dezesseis amostras estudadas. Porém, a intensidade não foi a mesma para os diversos tipos de material/revestimento. Em particular, observou-se que quantidade de vazios nas zonas 3 e 4 foi menor nas amostras fabricadas em ferro fundido branco de alto cromo, seguidas pelas amostras revestidas com TiN, pelas amostras revestidas com CrN e, por último, as amostras nitretadas.

Com relação às demais análises, as Figs. 4 e 5 apresentam os resultados comparativos obtidos com a estimativa da perda de volume e com o parâmetro de rugosidade Ra das

amostras, respectivamente. Os dados da perda de massa, bem como a comparação de outros parâmetros de rugosidade podem ser obtidos no trabalho publicado por Silveira *et al.* (2000).

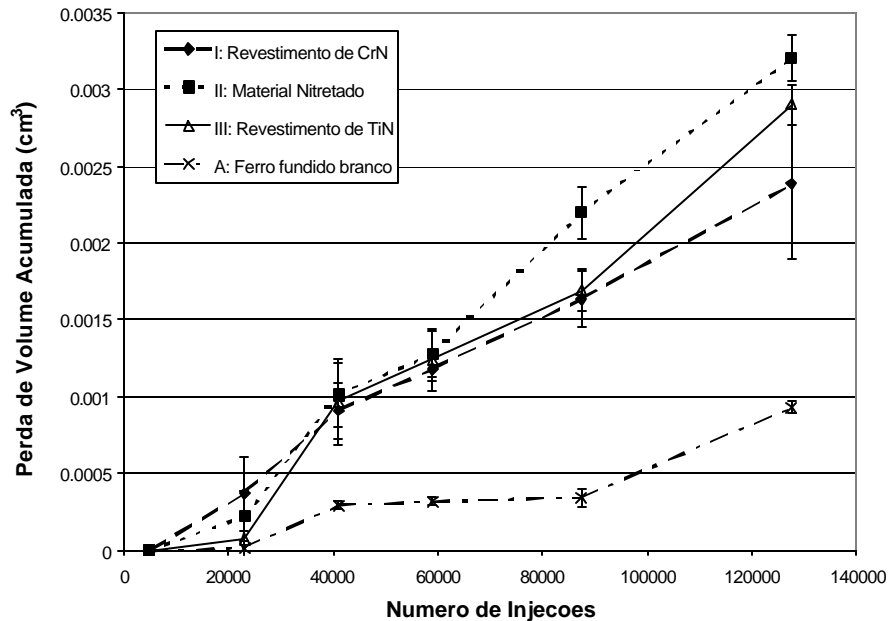


Figura 4: Comparação da perda acumulada de volume de machos com diferentes características utilizados durante processo de injeção de termoplásticos

#### 4. DISCUSSÃO

Em termos gerais, foi possível observar que, independentemente do tipo de material/revestimento, a mesma tendência foi observada nas amostras. Mesmo em se tratando de um material polimérico sem carga, uma significativa quantidade de riscos de abrasão foi observada nas amostras os quais, assim como no trabalho de Heinze (1998), podem ter sido originados pelo óxido de titânio utilizado para dar cor ao polímero. Da mesma forma, tal qual no aparato experimental desenvolvido por Heinze (1998), foi possível notar que mecanismos de corrosão, caracterizados pelas cavidades e vazios distribuídos nas amostras, passaram a atuar junto aos mecanismos de desgaste toda vez que o polímero fundido ficou em contato com as paredes dos machos. Isso não foi observado na zona 1 (Fig. 3a) provavelmente porque o fluxo de material polimérico iniciou-se sobre os machos somente a partir de um dos lados (vista A da Fig. 2) da zona 2, o que igualmente pode explicar porque a zona 2 não apresentou características uniformes ao longo de toda a circunferência.

Uma explicação adicional deve ser dada para o desgaste bastante acentuado observado na zona 4 que, neste caso, deve estar associado a questões construtivas do molde, principalmente no que se refere à extração da peça injetada.

Outro fato interessante observado nas amostras como um todo foi a não observação de uma redução significativa na média aritmética do parâmetro de rugosidade Ra ao longo da utilização dos jogos de machos fabricados com diferentes materiais/tratamentos. Mais uma vez, a explicação pode estar associada à presença de corrosão já que, como descrito anteriormente por Bull *et al.* (2000), à medida que o tempo de utilização da peça aumenta, os fenômenos de corrosão-desgaste podem tornar-se mais severos em regiões localizadas da mostra, resultando no destacamento de debris e aumento da rugosidade superficial.

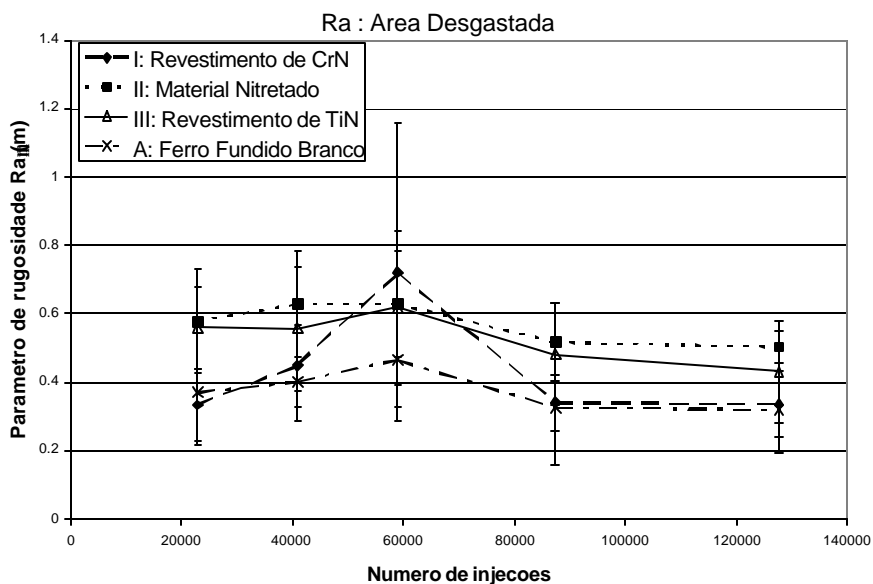


Figura 5: Comparação do parâmetro de rugosidade Ra de machos com diferentes características utilizados durante processo de injeção de termoplásticos

Em termos comparativos, os resultados apresentados quanto à perda de volume (Fig. 4) indicam uma superioridade dos machos fabricados em ferro fundido branco de alto cromo. Porém, mais uma vez o trabalho de Bull *et al.* (2000) deve ser citado, uma vez que os autores salientaram a dificuldade em remover-se de forma eficaz os resíduos de material polimérico que ficam aprisionados nas amostras após os testes, mesmo quando as amostras foram submetidas a tratamentos prolongados em ultra-som. Segundo esses autores, não seria de se estranhar se ganhos de massa fossem observados nas amostras o que, por sinal, também foi obtido (mas não discutido) no trabalho de Heinze (1998). Por outro lado, Bull *et al.* (2000) informam que a microscopia não foi capaz de identificar material polimérico aprisionado nos vales da rugosidade superficial, mas sim em trincas e poros de algumas superfícies. Sendo assim, mesmo com o questionamento proposto por Bull *et al.* (2000) para os resultados obtidos com a perda de volume, é possível admitir-se que o ferro fundido branco de alto cromo ainda é o material que apresentou o melhor desempenho, visto que as análises por microscopia óptica mostraram que o nível de porosidade foi muito menor nas amostras deste material e que, portanto, a chance de se ter material polimérico aprisionado nas mesmas ficou reduzida.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho observou-se que os materiais selecionados para fabricação de moldes para injeção de PVC ficam submetidos a situações próximas das encontradas na extremidade final da rosca de injeção, ou seja, o molde fica em contato com material polimérico fundido, o qual danifica as paredes do molde através de um processo sinérgico de corrosão e desgaste. Dentre os quatro tipos de materiais/tratamentos superficiais estudados, o ferro fundido branco de alto cromo foi aquele que apresentou melhor desempenho, mesmo quando se considerou que os valores estimados de perda de volume poderiam ter sido mascarados pela aprisionamento de material polimérico em trincas e poros distribuídos na superfície das amostras.

## ***Agradecimentos***

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela ajuda obtida através do processo número 99/12723-8 e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo auxílio obtido para as Redes Cooperativas de Pesquisa (RECOPE), Rede Metal-Mecânica, Sub-rede de Melhorias das Superfícies (Processo 1406/96).

## **REFERÊNCIAS**

- Bull, S.J., Davidson, R.I., Fisher, E.H., McCabe, A.R. & Jones, A.M., 2000, A simulation test for the selection of coatings and surface treatments for plastics injection moulding machines, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 130, pp. 257-265.
- Dearnley, P.A., 1999, Low friction surfaces for plastic injection moulding dies – an experimental case study, *Wear*, vol. 225-229, pp. 1109-1113.
- Devos, P., Boher, C., Raymond, J.J., Leroux, S., Arcens, J.P. & Wesselmann, M., 1999, Full scale wear study of polymer injection moulding tool surface, *Tool Steels in the Next Century: Proceedings of the 5th International Conference on Tooling*, September 29 – October 1, Austria, pp. 763-768.
- Friesenbichler, W., Langecker, G.R., Lichtenegger, G. & Hochoertler, G., 1999, Wear testing apparatus with integrated measuring technology for measuring the abrasive/corrosive wear on steels for plastic molds, *Tool Steels in the Next Century: Proceedings of the 5th International Conference on Tooling*, September 29 – October 1, Austria, pp. 691-700.
- Heinze, M., Mennig, G. & Paller, G., 1995, Wear resistance of PVD coatings in plastics processing, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 74-75, pp. 658-663.
- Heinze, M., 1998, Wear resistance of hard coatings in plastics processing, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 105, pp. 38-44.
- Silveira, A.P.P., 1999, A experiência da Astra na RECOPE, *Anais do I Workshop Desafios e Experiências em Moldes para Conformação de Plásticos*, June 29, São Paulo, pp. 128-131.
- Silveira, A.P.P., 1999, A experiência da Astra na RECOPE – Primeiras Análises, *Anais do II Workshop Moldes para Conformação de Plásticos*, June 30, São Paulo, pp. 11-17.

## **COMPARATIVE STUDY ON THE WEAR BEHAVIOR OF TOOLS FOR THE PVC PROCESSING MANUFACTURED IN WHITE CAST IRON AND H13 STEEL SUBJECTED TO THREE DIFFERENT SURFACE TREATMENTS**

***Abstract.*** *This work presents a comparative study on the wear behavior of four materials selected for tools used during the injection moulding of polyvinyl chloride (PVC). A total of sixteen tools were mounted in an injection moulding machine and put into actual manufacturing conditions. Four of them were manufactured in high chromium white cast iron and the others in H13 tool steel subjected to three different types of surface treatments. Four specimens were gas nitrided, four were coated with chromium nitride (CrN) and four were coated with titanium nitride (TiN). The comparative study was conducted during stops of the injection moulding process, when the specimens were extracted from the equipment and characterized in terms of mass loss and roughness and observed under an optical microscope. The results indicated that, for this given application, the tools manufactured in high chromium white cast iron provided the best results, followed by those manufactured in H13 steel coated with CrN, those coated with TiN and, finally, by those that were nitrided.*

***Keywords:*** *Wear, Injection moulding, Polymers, Surface Treatments, White Cast Iron*