

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE SUPERFÍCIES DE FERRAMENTAS DE ESTAMPAGEM COM E SEM REVESTIMENTO ¹

Marco Aurélio Rosso Santana Mendes ²

Roberto Martins Souza ³

Paulo Konrad Vencovsky ⁴

Resumo

Ferramentas de estampagem sem recobrimento têm, geralmente, seu fim de vida determinado, graças a um fenômeno de desgaste por deslizamento conhecido como esfoliação (*galling*). Esse fenômeno tem início com a adesão da superfície de chapas estampadas às ferramentas de conformação. Nesse trabalho acompanharam-se 8 condições diferentes de estampagem, com o objetivo de identificar os principais mecanismos de desgaste de ferramentas com e sem revestimento. A aplicação de revestimentos cerâmicos de TiN, TiCN, CrN, TiCNAl, nas ferramentas provavelmente diminuiu significativamente a afinidade química entre os corpos em contato a ponto do fenômeno de adesão não ter mais sido observado. Nesses casos o fim de vida das ferramentas revestidas passou a ocorrer por problemas de alinhamento do conjunto punção-matriz.

Palavras-chave: Estampagem; Revestimento; Desgaste; Esfoliação (*Galling*)

TRIBOLOGICAL ANALYSIS OF COATED AND UNCOATED SHEET METAL FORMING TOOLS SURFACES

Abstract

The life of uncoated sheet metal forming tools is usually determined by a type of sliding wear known as galling. This phenomenon starts with the adhesion between sheet surface and the forming tools. In this work, 8 different stamping operations were followed to identify the main wear mechanisms of coated and uncoated tools. The application of ceramic coatings of TiN, TiCN, CrN, TiCNAl, on the analyzed tools, probably decreased the chemical affinity between the contact bodies, such that the adhesion phenomenon was not observed. In this cases the coated tool life was determined by alignment problems in the press, which resulted in punch-die contact.

Key words: Sheet metal forming (SMF); Coating; Wear; Galling.

¹ Contribuição técnica ao 5º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 22 e 23 de agosto de 2007, São Paulo – SP, Brasil.

² Engº mestrando do Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP

³ Profº assistente Dr do Laboratório de Fenômenos de Superfície da EPUSP

⁴ M Eng. Gerente de unidade da Brasimet Bodycote

1 INTRODUÇÃO

A estampagem é um processo de conformação mecânica no qual estão envolvidos diversos fatores que resultam em desgaste, os quais, segundo Rooij,⁽¹⁾ podem ser englobados em um sistema tribológico, representado na Figura 1.⁽¹⁾

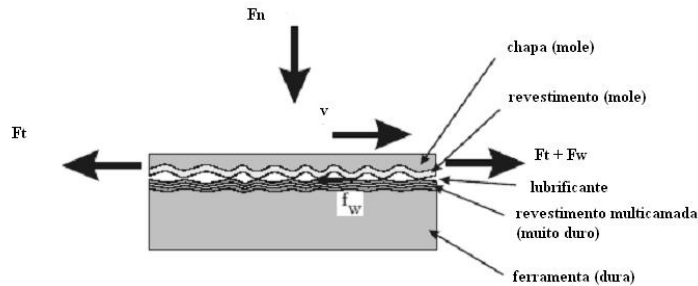


Figura 1 - Sistema tribológico presente em uma operação de conformação mecânica.⁽¹⁾

Os quatro elementos que compõem o sistema são:

- Ferramenta de conformação: que pode ser revestida com um material mais duro para minimizar o desgaste;
- Peça a conformar: é feita de um material mais mole que a ferramenta. Essa peça pode ser revestida com um material de menor resistência ao cisalhamento;
- Lubrificante e;
- Meio externo.

A superfície da ferramenta de conformação, mesmo sendo muito mais dura do que a da peça, sofre desgaste. As formas de desgaste que podem ocorrer nesse tipo de operação são: desgaste por deslizamento e desgaste abrasivo. Entretanto, não há uma fronteira bem definida entre esses dois tipos de desgaste, podendo, inclusive, ocorrerem simultânea ou consecutivamente, como indicado por Hutchings.⁽²⁾

O desgaste por deslizamento acontece quando um material mais mole se adere na superfície da ferramenta e, após sucessivas solicitações, se desprende da mesma levando consigo parte da ferramenta.

Um modelo sugerindo o aparecimento de uma partícula de desgaste por deslizamento, conforme a **Figura 2**, foi proposto em 1979, por Sasada.⁽³⁾

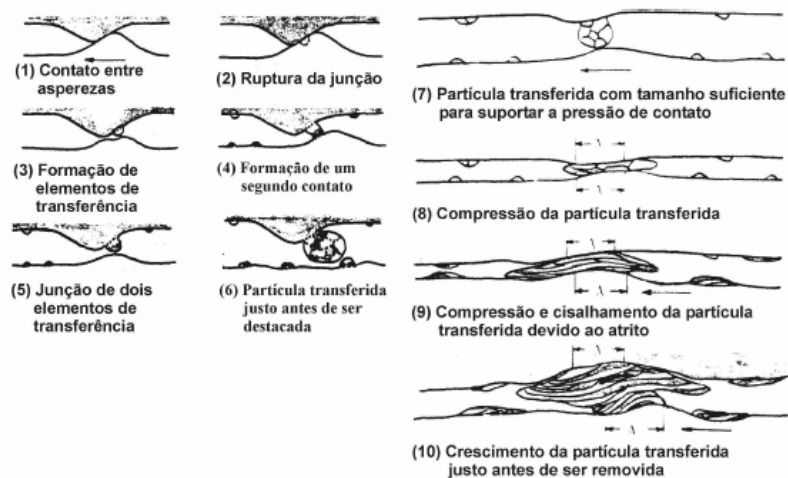


Figura 2 – Modelo de formação de uma partícula de desgaste proposto por Sasada em 1979 (adaptado por Farias⁽⁴⁾)

No modelo pode-se ver que o primeiro contato entre as superfícies é dado entre as asperezas das mesmas e, como as asperezas têm áreas de contato muito pequenas, a tensão que elas sofrem é muito elevada, chegando a ultrapassar seu limite de resistência. Sendo assim, a aspereza se desprende da superfície original e fica solta até se aderir, ou à outra partícula solta, ou à outra superfície.

De acordo com Peterson,⁽⁵⁾ a aplicação de elevadas cargas sem lubrificação ou com lubrificação insuficiente, no desgaste por deslizamento, pode levar a um dano severo da superfície conhecido como esfoliação (*galling*), que pode ser considerado como um processo de deformação plástica da superfície, dependente do coeficiente de atrito, da distribuição das tensões e da resposta do material à tensão aplicada.

Heide e Schipper⁽⁶⁾ afirmam que o tempo de vida das ferramentas de estampagem é freqüentemente limitado pela esfoliação (*galling*) e que essa forma de desgaste se inicia com a ruptura da camada de filme lubrificante entre os metais em contato. Entretanto, há trabalhos, como o de Carlsson e Olsson,⁽⁷⁾ que estudam o sistema tribológico substituindo o fluido lubrificante por revestimentos sólidos de filmes finos, que conferem um atrito mais reduzido do que no contato metal contra metal e também evitam a esfoliação (*galling*). Andreasen, Bay e Chiffre⁽⁸⁾ encontraram uma forma de identificar a esfoliação (*galling*) por meio de evoluções de perfis de rugosidade, como pode ser visto na Figura 3. Os picos e vales indicam, nesse caso, que está ocorrendo adesão e arrancamento na superfície, fato que causará a esfoliação (*galling*).

Os vales que aparecem nos perfis de rugosidade são causados pelo arrancamento de material da superfície, como pode ser observado nas etapas 2 e 3 da Figura 2. Já os picos são causados pelos materiais que se aderem à superfície durante o contato.

Com a evolução do processo a topografia do corpo analisado vai se alterando, se tornando mais rugosa e essas novas asperezas, por terem uma área mais reduzida, concentram tensão no contato e sofrem um aumento de temperatura devido à deformação plástica. Esses 2 efeitos contribuem para o aumento da adesão entre as superfícies.

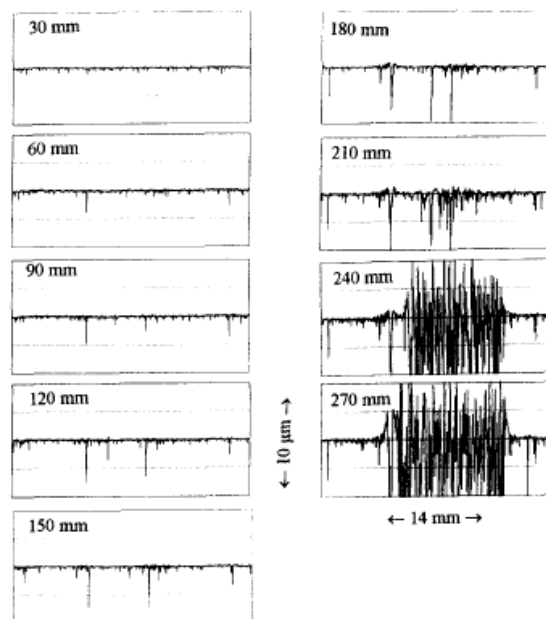


Figura 3 – Evolução da topografia de uma ferramenta num ensaio de desgaste por deslizamento

O outro tipo de desgaste geralmente encontrado nas ferramentas de conformação é o desgaste abrasivo.

No desgaste abrasivo, uma partícula dura entra, ou surge, na interface do sistema e o movimento relativo que há entre as superfícies faz com que o abrasivo provoque riscamentos na superfície causando o seu desgaste.

Alguns mecanismos de desgaste abrasivo foram propostos por Kato e Hokkirigawa,⁽⁹⁾ em 1985, como indicado na Figura 4.

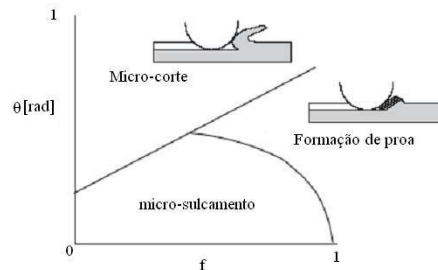


Figura 4 – Mecanismo de abrasão propostos por Kato e Hokkirigawa em 1985.⁽⁹⁾

No eixo das ordenadas, o ângulo θ representa o ângulo de penetração do abrasivo em relação à superfície e no eixo das abscissas representa-se a relação (f) entre a tensão de cisalhamento da interface (ζ) com a tensão de resistência ao cisalhamento do material mais mole (τ), conforme a Equação 1.

$$f = \frac{\zeta}{\tau} \quad \text{Eq. 1}$$

De acordo com Hutchings,⁽²⁾ o abrasivo irá causar deformação plástica se a relação entre a dureza do abrasivo (H_a) e a dureza da superfície (H_s) for maior que 1,2, ou seja, se $H_a/H_s > 1,2$. Então, se tivermos uma superfície mais dura, essa relação será menor e o desgaste será bastante reduzido, o que contribui para o aumento da vida útil da ferramenta.

Como a região da peça que mais se desgasta é a superfície, não é necessário que se aumente a dureza da ferramenta inteira para diminuir o desgaste. Uma das maneiras encontradas para se aumentar a dureza superficial de uma peça é depositar sobre ela uma camada de filme fino. Esses filmes são formados por materiais de dureza bastante elevada em relação às ferramentas sobre as quais são depositados; conferindo assim, maior resistência ao desgaste e uma tenacidade adequada ao esforço solicitado e, além disso, eles apresentam outra vantagem, que é o coeficiente de atrito mais reduzido.⁽¹⁾

Os filmes mais utilizados atualmente são depositados pelo método de deposição física de vapor (PVD), ou deposição química de vapor (CVD).

Na atualidade, a maioria dos revestimentos aplicados por PVD e CVD é formada por DLC, nitretos ex.: TiN, CrN, TiAlN carbetos ex.: TiC, CrC, óxidos (ex. alumina), ou ainda uma combinação destes como o TiCNAI.

O objetivo desse trabalho foi entender e caracterizar os mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de estampagem não revestidas e compreender como os revestimentos contribuem com o aumento de vida dessas ferramentas. Para tanto, acompanharam-se 8 condições diferentes de estampagem com e sem revestimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os punções indicados na Tabela 1 foram utilizados, em escala industrial, para a estampagem de chapas de 0,8 mm de espessura em aço 16MnCr5 lubrificadas com óleo para estampagem em diferentes operações. A Tabela 1, igualmente indica os materiais e tipos de revestimentos das ferramentas que foram aplicados por processo PVD, segundo parâmetros praticados industrialmente pela empresa Brasimet Bodycote.

Tabela 1– Operações e materiais

Condição	Substrato	Revestimento	Dureza superficial	Operação	Produção
1	AISI H13	Nenhum	595 HV~ 52 HRC	Calibragem	32.000 peças
2	AISI M2	Nenhum	746 HV~ 61 HRC	Corte	175.000 peças
3	AISI M2	Nenhum	746 HV~ 61 HRC	Dobra	175.000 peças
4	AISI M2	Nenhum	746 HV~ 61 HRC	Pranchamento	94.000 peças
5	AISI H13	TiCN	2900 HV	Calibragem	1 milhão de peças
6	AISI M2	TiCN	2900 HV	Pranchamento	1 milhão de peças
7	AISI M2	TiCNAI	3500 HV	Calibragem	1.200.700 peças
8	AISI M2	TiCNAI	3500 HV	Pranchamento	1.200.700 peças

A composição química do aço 16MnCr5 está indicada na Tabela 2

Tabela 2 – Composição química do aço 16MnCr5

DIN	C	Si	Mn	P	S	Cr
16MnCr5	0,14/0,19	0,15/0,40	1,00/1,30	0,035 máx	0,035 máx	0,80/1,10

Fonte: Site http://www.acosvic.com.br/tabela02_en.php da empresa Aços Vic acessado em 06/07/2007

Os punções das condições de 1 a 6 foram utilizados em diferentes etapas na produção de peças com dimensões finais de 30 mm de diâmetro por 25 mm de profundidade; os das condições 7 e 8, produziram peças com dimensões finais de 16 mm de diâmetro por 12 mm de profundidade.

Com a finalidade de identificar os mecanismos de desgaste e correlacioná-los com a literatura, os métodos empregados para analisar as superfícies desgastadas foram: medições do perfil de rugosidade, microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) e medições de dureza.

3 RESULTADOS

Os resultados foram divididos nas condições sem revestimento e com revestimento com o intuito de separar os fenômenos envolvidos.

3.1 Sem Revestimento

Analisaram-se 4 condições de operação de ferramentas sem revestimento, conforme indicado na Tabela 1

A superfície do punção de corte, que operou na condição 2 da Tabela 1 apresentou o aspecto mostrado na Figura 5. Nota-se que esse detalhe da ferramenta pode ser dividido em 2 regiões. A região da esquerda apresenta as marcas de retífica,

enquanto a região da direita, de aproximadamente 1 mm de largura, mostra que a ferramenta sofreu alguma alteração superficial na área de contato com a chapa.

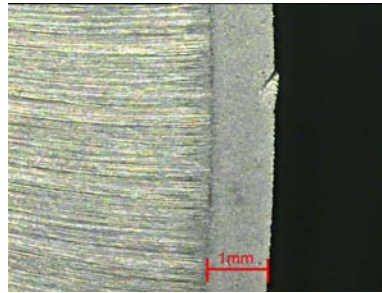


Figura 5 –Detalhe da região de trabalho do punção de corte usado na operação 2 da Tabela 1

A alteração sofrida pela aresta de corte da ferramenta pôde ser evidenciada, além da análise visual, comparando-se os perfis de rugosidade das regiões com e sem desgaste. Dessa forma, foi possível tirar mais conclusões sobre a topografia da superfície, conforme se observa na Figura 6.

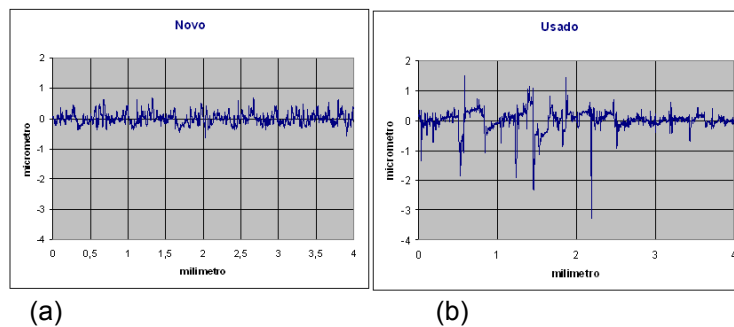
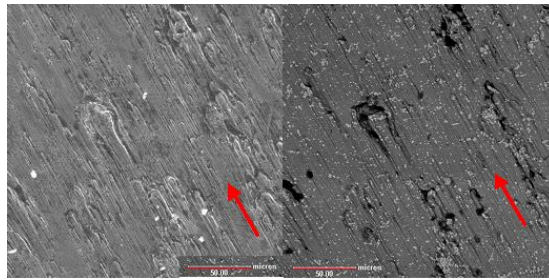


Figura 6 - Perfil de rugosidade em regiões da superfície do punção usado na operação 2 da Tabela 1 (a) intacta (b) desgastada

O perfil da região desgastada apresenta picos e vales mais pronunciados do que o da região intacta. Essa é uma característica do desgaste por deslizamento conhecido como esfoliação (*galling*).⁽⁸⁾ Outra ferramenta útil para analisar a superfície dessas ferramentas é o MEV, pois além da possibilidade de observar a superfície com um grande aumento, podem-se identificar diferenças de composição química no material da peça em análise. Na Figura 7 pode-se ver a superfície do punção de corte com maior aumento. Com a técnica de elétrons secundários pôde-se visualizar melhor o relevo da peça. Enquanto a técnica de elétrons retroespalhados é mais útil na diferenciação dos elementos químicos presentes no material.



(a) (b)

Figura 7 - Região desgastada do punção de corte observada por MEV pela técnica de (a) elétrons secundários (b) elétrons retroespalhados.

Na Figura 7(a) pode-se notar um acúmulo de material em certas regiões da ferramenta e observa-se também um fluxo de material no sentido indicado pela seta. Esse fluxo de material corresponde ao deslizamento do material da peça conformada sobre a superfície do punção. A região em que ocorre acúmulo de material corresponde aos picos de rugosidade que aparecem no perfil de rugosidade na Figura 6 (b).

Na Figura 7 (b), as regiões mais claras representam os carbonetos presentes na microestrutura do material, as regiões em cinza escuro representam a matriz martensítica e as regiões em preto indicam buracos ou algum material aderido de baixo peso atômico.

As regiões da ferramenta que deformaram com o deslizamento da chapa conformada foram as regiões da matriz e não as dos carbonetos. Adicionalmente não foi observada abrasão, nem nos carbonetos, nem na matriz. Esses fatos apontam para o fenômeno da adesão como principal responsável pelo tipo de desgaste que ocorreu nesses punções, mesmo havendo lubrificação das chapas.

Os punções de calibragem e de pranchamento das condições 1 e 4, respectivamente, apresentavam geometrias bastante semelhantes, mas foram produzidos com materiais diferentes. As superfícies dessas ferramentas, após o uso, estão apresentadas na Figura 8. Na imagem do punção de calibragem, Figura 8 (a), pôde-se notar que a ferramenta sofreu riscamento nos sentidos indicados pelas setas vermelhas e também notou-se que há material aderido nos locais indicados pelas setas amarelas. Pôde-se dizer, então, que nesse tribossistema houve desgaste por deslizamento devido à adesão e desgaste abrasivo, esse último evidenciado pelos riscos radiais.



(a) (b)

Figura 8 – Superfície desgastada dos punções usados nas condições 1 e 4 da Tabela 1 (a) calibragem e (b) pranchamento

Na figura do punção de pranchamento Figura 8 (b), a superfície desgastada é muito semelhante à área desgastada do punção de corte (Figura 5). Por limitações geométricas, não foi possível medir a rugosidade dessa região em nenhuma dessas duas ferramentas. Dessa maneira, além da (MO), só foi possível caracterizar a superfície dessas duas ferramentas por (MEV), como se observa na Figura 9.

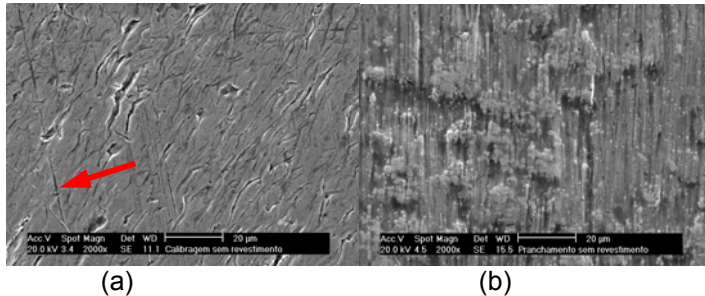


Figura 9 – Superfícies desgastadas dos punções usados nas operações 1 e 4 da Tabela 1, observados com MEV (a) calibragem e (b) pranchamento

Na superfície do punção de calibragem podem-se ver vários buracos indicando remoção de carbonetos, que é um mecanismo de desgaste típico de abrasão, de acordo com Hornbogen.⁽¹⁰⁾ Observaram-se também, nessa superfície, alguns riscos que atravessam a figura de baixo para cima, como indicado pela seta, evidenciando que algum material mais duro do que a ferramenta passou por esse local. É importante salientar, nesse caso, que o desgaste observado ainda não foi muito severo, porque esse punção conformou apenas 32 mil peças.

O tipo de desgaste encontrado na borda do punção de pranchamento é o mesmo que o encontrado no punção de corte mostrado na Figura 5, ou seja, ocorre o desgaste por deslizamento conhecido como esfoliação (*galling*), promovido pela adesão entre a matriz martensítica e a chapa de aço 16MnCr5; sendo que os carbonetos permanecem indeformados.

Esses dois punções também tiveram suas laterais analisadas nas regiões indicadas pelas setas vermelhas na Figura 10, porque apresentaram desgaste acentuado nesses locais. Supõe-se que as falhas severas observadas nessas figuras são oriundas de um possível desalinhamento entre o punção e a matriz, que é fabricada em metal duro e tem uma dureza de aproximadamente 1600HV.

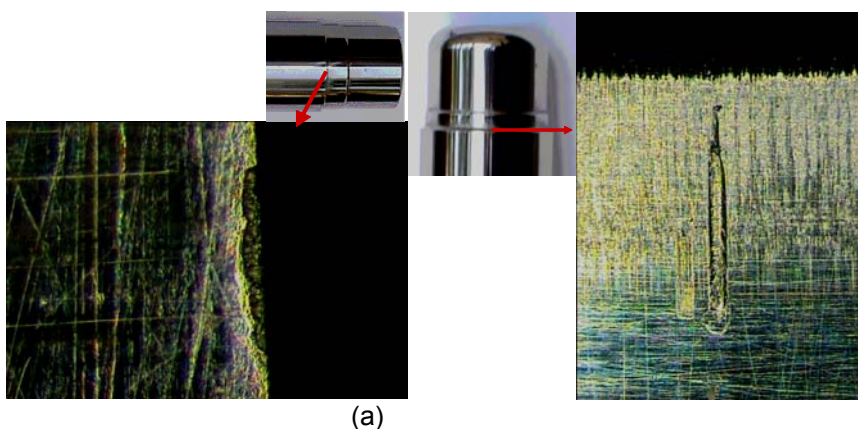


Figura 10 – Detalhe da região lateral das ferramentas usadas nas operações 1 e 4 da Tabela 1 (a) pranchamento e (b) calibragem

O último punção sem revestimento analisado foi o da condição 3 da Tabela 1. Na Figura 11, observa-se um detalhe da superfície desgastada que é muito semelhante às regiões desgastadas das ferramentas de corte e pranchamento.

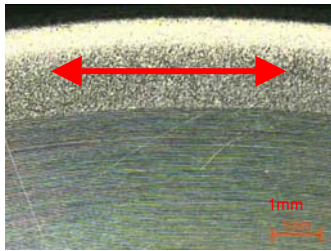


Figura 11 – Região desgastada do topo do punção de dobra usado na condição 3 da Tabela 1

Para caracterização dessa superfície foi realizada medição de rugosidade no local indicado pela seta vermelha na Figura 11. Essa medida foi conduzida da mesma forma que a medida foi realizada no punção de corte, e o perfil obtido está mostrado na Figura 12.

O fenômeno ocorrido para formar esses perfis de rugosidade são os mesmos que ocorreram no punção de corte, ou seja, o perfil da região intacta foi formado pelo rebolo; enquanto o perfil da região desgastada foi decorrente da adesão e arrancamento de material, que ocorreram na superfície da ferramenta.

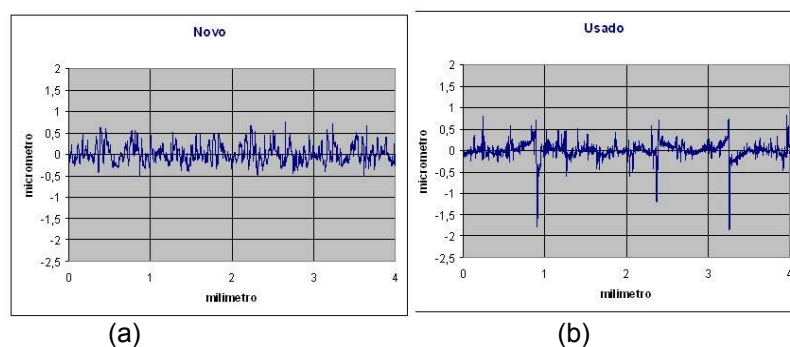


Figura 12 – Perfil de rugosidade de regiões do punção usado na condição 3 da Tabela 1 (a) intacta e (b) desgastada

3.2 Com Revestimento

Os punções revestidos fazem parte das condições de 5 a 8 da Tabela 1.

Na Figura 13 estão representadas as superfícies desgastadas oriundas das condições 5 e 6 da Tabela 1.

O punção da condição 5 não apresentou danos na superfície de topo que justificassem seu fim de vida; o da condição 6, apresentou desgaste nas bordas exibindo, inclusive, remoção do revestimento em pequenas regiões. A região dourada é devida ao prévio recobrimento de TiN que é aplicado para a posterior deposição do TiCN.

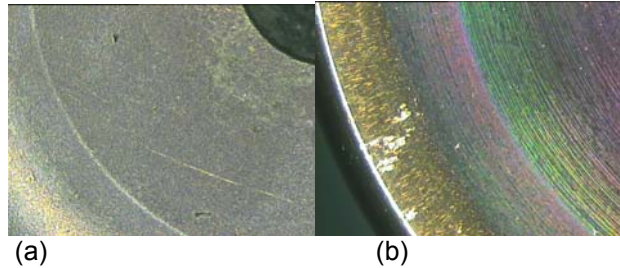


Figura 13 – Superfícies desgastadas dos punções usados nas operações 5 e 6 da Tabela 1 (a) calibragem e (b) pranchamento

Na Figura 14 observam-se avarias graves nos punções que transmitiam imperfeições às peças estampadas e que, portanto, foram responsáveis pelo fim de vida dessas ferramentas.

No caso da ferramenta da condição 5 os riscos observados são causados por material da matriz, fabricada em metal duro, que, devido ao desgaste que sofrem se desprendem da ferramenta entrando no sistema tribológico causando o riscamento dos mesmos.

No punção de pranchamento acredita-se que um desalinhamento do punção em relação à matriz, ocasionou o contato de um lado do punção com o metal duro, ou, simplesmente, sobrecarregou o revestimento até que este não suportou o esforço e foi removido do substrato.

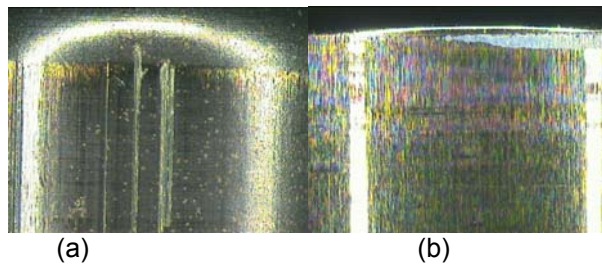


Figura 14 – Superfície lateral desgastada dos punções usados nas operações 5 e 6 da Tabela 1 (a) calibragem e (b) pranchamento

Outro conjunto de ferramentas analisadas, mostrados na Figura 15 e Figura 16 foi composto pelos punções das condições 7 e 8 da Tabela 1.

Foi possível notar na Figura 15 que, mesmo esses punções menores, também sofreram desgaste diferenciado em suas laterais (Figura 15 (b)), indicando desalinhamento entre o par de ferramentas punção e matriz, enquanto o topo da ferramenta Figura 15 (a) não apresenta evidências de ter sido desgastado.

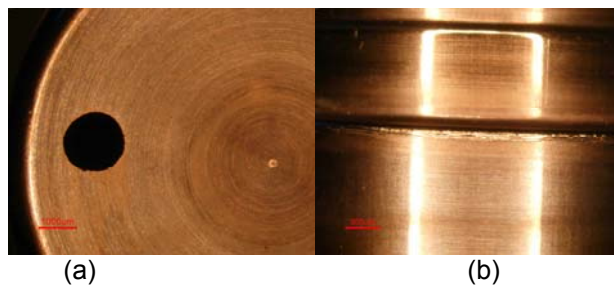


Figura 15 – Punção de 1ª calibragem usado na operação 7 da Tabela 1 (a) vista de topo (b) vista lateral

Na Figura 16 (a) pode-se ver que houve um início de desprendimento de material do revestimento nos locais indicados pelas setas. Porém, o desgaste ainda estava bastante reduzido nessa região como um todo. Não houve evidências nem de adesão, nem de abrasão.

Na vista lateral dessa ferramenta (Figura 16 (b)) podemos ver o mesmo problema que ocorreu em todos os punções anteriores, que foi um desgaste lateral mais acentuado, devido à abrasão que ocorreu nessa superfície.

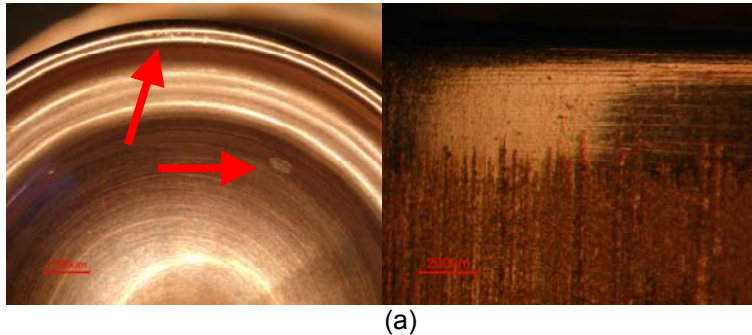


Figura 16 – Superfície desgastada do punção de pranchamento usado na operação 8 da Tabela 1 (a) vista de topo (b) vista lateral

4 DISCUSSÃO

Com relação às ferramentas das condições 1 e 4 pôde-se notar na Figura 8(a) e Figura 8 (b) a ocorrência de diferentes fenômenos.

Os riscos que aparecem no punção de calibragem (Figura 8 (a)) indicam a ocorrência de abrasão, fato que não ocorreu nas ferramentas de aço AISI M2. A diferença de dureza entre esses dois punções pode explicar o fato da ferramenta de calibragem estar sofrendo penetração por algum abrasivo enquanto que a de pranchamento não sofrer esse fenômeno e apresenta apenas a esfoliação (*galling*) devido à afinidade química entre os pares em contato.

Então, já nesse ponto, é razoável admitirmos que um revestimento cerâmico, que tem como características: elevada dureza para minimizar a abrasão e baixa afinidade química com materiais metálicos para diminuir a adesão, seja um material adequado para a diminuição da degradação superficial dessas ferramentas de estampagem.

Analisando-se a Figura 13 e comparando-se com a Figura 8, pode-se notar que a aplicação dos revestimentos de TiCN causou a diminuição dos danos sofridos pelas ferramentas, sobretudo levando em conta a diferença de peças que essas ferramentas produziram.

A esfoliação (*galling*), principal mecanismo responsável pela inutilização de ferramentas de estampagem não revestidas, deixou de ser observado quando as ferramentas foram revestidas com qualquer filme fino.

Também é possível perceber pelas análises da Figura 8 e Figura 13 que os punções de pranchamento sofreram um esforço superior aos de calibragem, porque a degradação das ferramentas de pranchamento foi maior do que a dos outros.

Entretanto em todos os casos em que as ferramentas foram revestidas, o fim de vida das ferramentas deveu-se a danos laterais provavelmente causados por desalinhamento entre o punção e a matriz e não pelos mecanismos de desgaste que ocorriam nas ferramentas sem revestimento.

5 CONCLUSÃO

Pôde-se concluir desse trabalho que os revestimentos cerâmicos aplicados em ferramentas de estampagem alteraram significativamente a intensidade de desgaste que ocorreram nessas peças.

A esfoliação (*galling*), forma de desgaste comumente responsável pelo fim de vida de ferramentas de estampagem, ocorre quando ferramentas de aço, sem revestimento, entram em contato com chapas de aço, mesmo estas estando lubrificadas.

Nesse trabalho, essa forma de desgaste deixou de ser observada quando as ferramentas revestidas com uma camada de filme fino.

Porém, os ganhos que essas peças, aparentemente, podem apresentar, são passíveis de serem comprometidos por problemas mecânicos como, por exemplo o desalinhamento entre punção e matriz que, no caso desse trabalho, impediu a comparação entre o desempenho dos revestimentos analisados. Entretanto, pôde-se ver que a diferença de produtividade de uma ferramenta revestida para uma sem revestimento é enorme.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pelo financiamento do projeto de número 550235/03-5.

REFERÊNCIAS

- 1 ROOIJ, MATHIAS BAS de. Tribological aspects of unlubricated deepdrawing processes. Tese de doutorado 1998
- 2 HUTCHINGS I. M. Tribology Friction and Wear of Engineering Materials. University of Cambridge, p 77, 1992.
- 3 SASADA, T. The behavior of adhered fragments interposed between sliding surfaces and formation process of wear particles. In: Wear of Materials: International Conference on Wear of Materials Vol 2 New York: ASME. p. 72-80, 1979
- 4 FARÍAS, MARIA CRISTINA MORÉ – Influência da velocidade de deslizamento, da carga normal e da transformação martensítica induzida por deformação plástica na resistência ao desgaste por deslizamento de aços inoxidáveis austeníticos, Tese de doutorado p 10 – 12, 2004
- 5 PETERSON, M. B., Galling wear of metals, Wear of materials. v 5 p 293 – 301, 1985
- 6 HEIDE, E VAN DER; SCHIPPER, D.J; Galling initiation due to frictional heating, Wear n 254, p 1127 – 1133, 2003
- 7 CARLSSON, P; OLSSON, M; Surface & Coatings Technology, v 200, n 14-15, p 4654-4663, 2006
- 8 ANDREASEN, J. L; BAY, N; CHIFFRE, L DE; Quantification of galling in sheet metal forming by surface topography characterization. International journal of machine tools and manufacture, v 38, n 5-6 p. 503 – 510, 1998
- 9 KATO, K.; HOKKIRIGAWA, K., Abrasive wear diagram, In Proceedings of Eurotrib, Amsterdã, Ecully, set. 9-12, 1985.
- 10 HORNBOGEN, E.; Description and wear of materials with heterogeneous and anisotropic microstructure. Wear v 111, p 391 – 402, 1986