



REVESTIMENTO PVD E NITRETAÇÃO SOB PLASMA APLICADOS EM FERRAMENTAS PARA CONFORMAÇÃO E CORTE A FRIO¹

Carlos Eduardo Pinedo²

Resumo

Ferramentas destinadas às operações de conformação e corte de metais trabalham em condições de elevadas solicitações mecânicas que exigem dos aços que compõe os ferramentais propriedades especiais de resistência e tenacidade. Além disto, é de extrema importância se considerar as solicitações tribológicas a que a superfície de trabalho é solicitada. Estas necessidades tribológicas exigem da superfície propriedades especiais para reduzir principalmente os efeitos do desgaste. Este trabalho apresenta os conceitos fundamentais de Tribologia que baseiam a necessidade de uso de revestimentos PVD. Também são apresentados resultados práticos de revestimento PVD, utilizando uma nova camada denominada HTS-V10, para ferramentas de conformação a frio e extrusão inversa nas quais se obteve considerável aumento na vida da ferramenta e na adesão do revestimento.

Palavras-chave: Trabalho a frio; Tribologia; Nitretação sob plasma; Revestimento.

PVD COATING AND PLASMA NITRIDING FOR COLD FORMING AND CUTTING TOOLS

Abstract

Tools for cutting and forming operations work under conditions that require from tool steel high mechanical properties such as strength and toughness. Moreover, it is extremely important to consider the tribological condition on the work surface and the requirements to increase the tool life. These tribological needs require special properties of the surface mainly to reduce the effects of wear. This paper presents the fundamental concepts of Tribology basing the need for use of PVD coatings. The paper presents practical results of PVD coating, using a new layer called HTS-V10, on tools for cold forming and back-extrusion which obtained considerable increase in tool life and adhesion behavior of the coating.

Key words: Cold work tool steel; Tribology; Plasma nitriding; Coating.

¹ Contribuição técnica ao 9º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 10 e 11 de agosto de 2011, São Paulo, SP.

² Doutor em Ciências. Diretor Técnico: Heat Tech - Tecnologia em Tratamento Térmico e Engenharia de Superfície Ltda e HTS Tecnologia em Revestimentos Ltda. Professor e Pesquisador da Universidade de Mogi das Cruzes.



1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O setor metal-mecânico está em sua grande parte ligado ao segmento de ferramentas, moldes e matrizes, visto que a fabricação dos produtos industriais depende de processos de usinagem e/ou conformação. Processos de fabricação, de forma ampla, utilizam ferramentas destinadas a dar forma e dimensão a produtos poliméricos, cerâmicos ou metálicos. Para isto, utilizam ferramentas que, em função do processo de conformação encontram-se submetidas a diferentes solicitações. As solicitações em uma ferramenta são as mais diversas, dependendo das condições de processo como: intensidade e tipo de carregamento mecânico, temperatura de trabalho, ambiente corrosivo, propriedades do material em conformação etc.

A variedade de processos de conformação exige, em contrapartida, uma variedade de aços especiais, aços ferramenta, que possam adequar sua estrutura e propriedades as diferentes condições de aplicação. De uma forma geral, o mercado dispõe de: Aços Rápido, Aços Ferramenta para Trabalho a Frio, Aços Ferramenta para Trabalho a Quente e Aços para Moldes de Injeção de Polímeros.

Para utilização destes aços são necessários procedimentos diferenciados de tratamentos térmicos têm sido utilizados de forma a condicionar sua microestrutura às propriedades necessárias para obter um maior desempenho em serviço. É importante salientar, no escopo deste trabalho, que não apenas os tratamentos térmicos são suficientes para atingir um desempenho ótimo de ferramentas, visto que as diversas solicitações exigem da superfície de trabalho propriedades diferenciadas que muitas vezes não podem ser atingidas pelos tratamentos térmicos por restrições impostas pelo aço ferramenta ou pela disponibilidade de processos de tratamento.

Em ferramentas é necessário considerar se o tratamento térmico condiciona propriedades como; resistência ao carregamento mecânico, resistência à fratura, resistência ao desgaste e resistência à corrosão em níveis suficientes para promover ótimo desempenho. Isto porque, o uso de tratamentos superficiais pode promover modificações estruturais na superfície que potencializam propriedades como; resistência ao desgaste, coeficiente de atrito, estabilidade térmico, resistência à corrosão, entre outras, em níveis não atingíveis por rotas convencionais de tratamento do aço.

Os tratamentos superficiais buscam satisfazer necessidades de interação entre as superfícies em contato durante a conformação que influenciam decisivamente no desgaste, como o coeficiente de atrito e a dureza. Ao conjunto de fenômenos envolvidos na interação de duas ou mais superfícies em contato, na presença ou não de lubrificação, tratamos como “Sistemas Tribológicos”.

1.2 Tribologia

Em ferramentas de trabalho a frio, por exemplo, os tratamentos superficiais têm como objetivo diminuir sensivelmente a taxa de desgaste abrasivo e adesivo na superfície de ferramentas. Os fatores micro-mecânicos que ocorrem na dimensão de poucos *microns* na superfície controlam a taxa de desgaste, sendo os mais importantes:

- a tensão e deformação presentes no contato entre as superfícies;
- a temperatura de contato;
- a geração de deformação entre os corpos em contato; e
- a geração e propagação de trincas com remoção e liberação de partículas que podem produzir a formação de riscos e crateras.

Ao se considerar um processo de conformação a frio, a interação entre a ferramenta e o corpo em deformação produz um sistema de deslizamento relativo entre os dois corpos. Este conjunto está sujeito a um sistema de forças (Figura 1). Neste sistema, para a manutenção do equilíbrio de forças, a força de deformação imposta pela prensa (P) gera a força normal (N) e a força de deslizamento (F) gera a força de atrito (F_A). Como resultado, a força de atrito é proporcional ao coeficiente de atrito (μ) e à força normal nas superfícies de contato. É importante salientar que as superfícies dos corpos não são perfeitamente planas, possuindo uma topografia composta por asperezas. O resultado do deslizamento contínuo deste sistema é a geração de desgaste em suas diferentes formas.

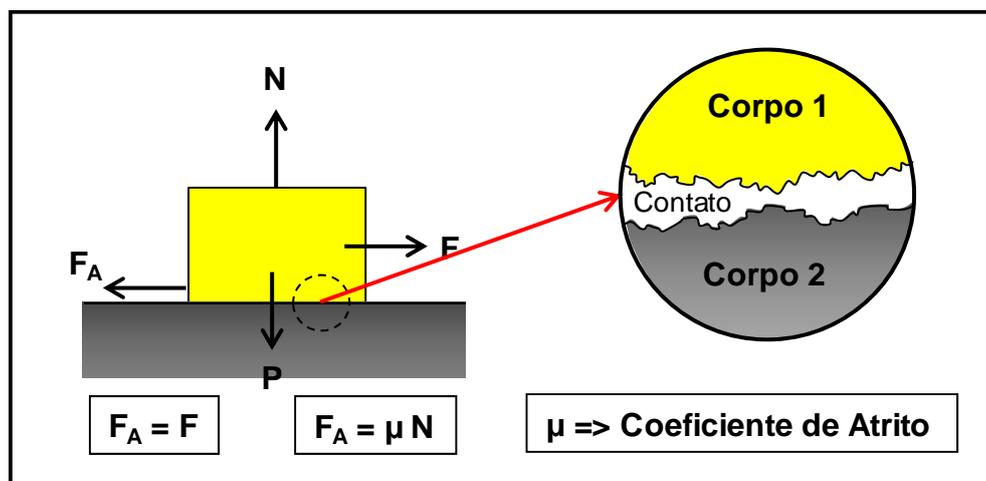


Figura 1. Condições de força existente em duas superfícies em contato e em deslizamento.

Como mencionado, o contato entre duas superfícies não ocorre em uma superfície plana, na forma que a vemos em escala macroscópica. O sistema de contato deve ser analisado em sua forma tridimensional (Figura 2). As superfícies não possuem apenas picos e vales como as avaliamos frequentemente por rugosidade (a). Em três dimensões deve-se controlar a distribuição destes picos e vales na superfície, sua topografia, (b). A resultante destas características gera os pontos reais de contato entre as duas superfícies que correspondem a aproximadamente 10% da superfície total, (c). Estes pontos de contato constituem-se nas asperezas.⁽¹⁾

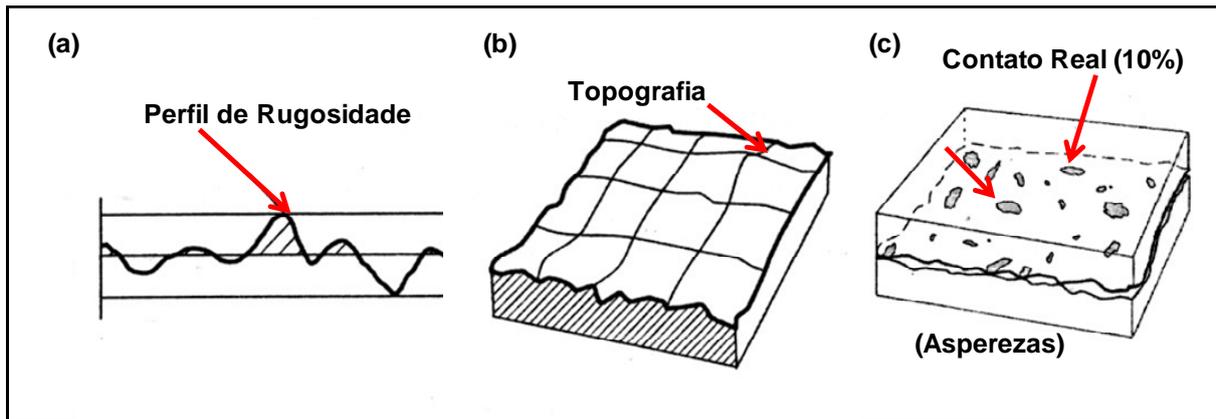


Figura 2. Superfície de contato entre dois corpos.⁽¹⁾

Nas superfícies de contato a distribuição de carga e temperatura não é homogênea, considerando que o contato não é perfeitamente plano e a presença das asperezas (Figura 3).⁽²⁾ Caso as superfícies fossem perfeitamente planas tanto a pressão de contato como a dissipação de energia na forma de calor seriam homogêneas, linhas tracejadas. Entretanto, como a interação ocorre apenas no contato das asperezas, tanto a pressão real quanto a temperatura, decorrente do atrito, são muito superiores.

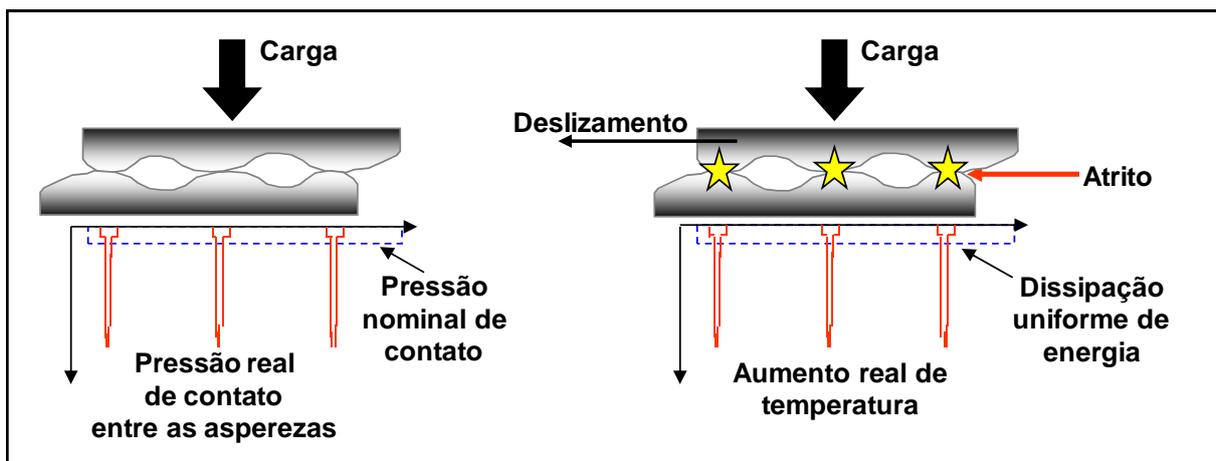


Figura 3. Distribuição de pressão e temperatura nas asperezas.⁽²⁾

Os fatores mostrados anteriormente são fundamentais no desenvolvimento do desgaste abrasivo e/ou adesivo, principalmente. A Figura 4 mostra, simplificada-mente os componentes de desgaste que podem estar presentes nos processos de conformação a frio. A interação de corpos em deslizamento pode gerar (i) adesão entre as duas superfícies com posterior fratura, (ii) a presença de um terceiro corpo, externo ou proveniente da fratura provocada pela adesão pode gerar sulcamento por um processo de desgaste abrasivo e (iii) a presença de deformação pode também, em caso extremo, provocar adesão ou fratura com a liberação de um terceiro corpo de desgaste.

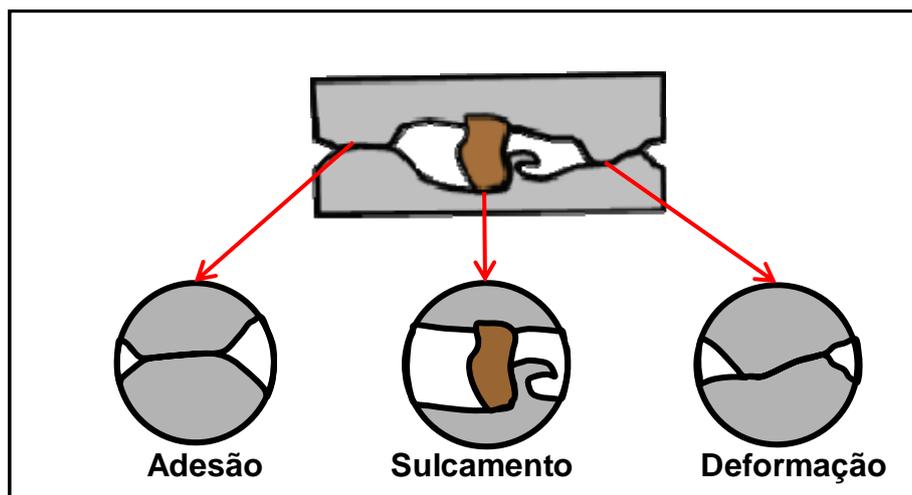


Figura 4. Três componentes do desgaste.⁽¹⁾

1.3 Revestimentos PVD

Por consequência do exposto anteriormente, as operações de conformação a frio de metais constituem-se em sistemas deslizantes de elevada sollicitação de carga. Nas condições de trabalho o material em deformação apresenta baixa plasticidade por consequência da baixa temperatura e necessita de elevadas cargas para escoar e preencher a cavidade. Estas cargas são proporcionais aos diferentes processos de conformação a frio, por exemplo; estampagem, forjamento, laminação, extrusão inversa, corte etc. Ainda, as características metalúrgicas do material em deformação devem ser consideradas à medida que ao se deformar aços de mais alta resistência mecânica, por necessidade do produto final, as forças de deformação também aumentam, e conjuntamente o desgaste. Também, na deformação de metais de outras bases, como ligas de alumínio, deve se considerar a sua diferença de plasticidade, por seu coeficiente de encruamento, e as novas condições do sistema tribológico presente nas superfícies de contato.

Neste contexto, os revestimentos têm sido utilizados de maneira crescente para diminuir o desgaste dos ferramentais. Sua atuação é principalmente no sentido de diminuir o coeficiente de atrito na região de contato e oferecer uma superfície de elevada dureza, cerca de 2.000 HV. Os principais parâmetros presentes em um sistema tribológico com o uso do revestimento é mostrado na Figura 5. Para o melhor desempenho do revestimento é necessário levar em consideração não apenas as características do próprio revestimento, mas as características globais da superfície, revestimento, interface revestimento/substrato e substrato. A Figura 6 mostra o sistema real, apresentado esquematicamente na Figura 5, para o revestimento PVD do aço ferramenta AISI D2 com TiN.⁽³⁾

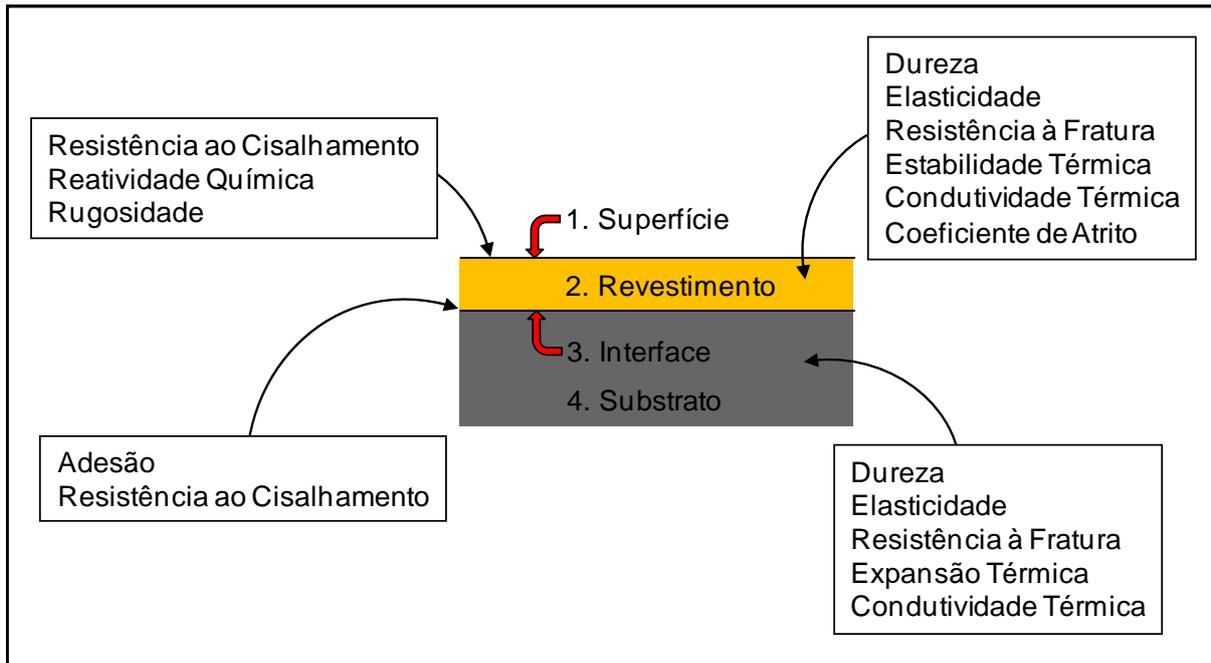


Figura 5. Revestimento de TiN em substrato de aço AISI D2.⁽¹⁾

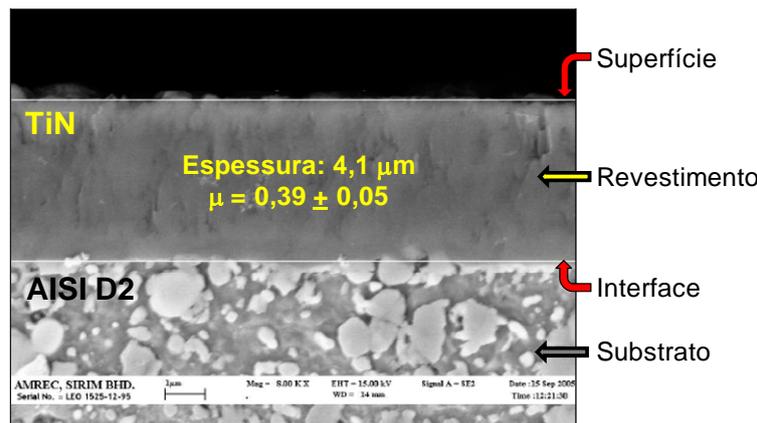


Figura 6. Revestimento de TiN em substrato de aço AISI D2.⁽³⁾

O objetivo deve ser compatibilizar o melhor possível estes quatro elementos para potencializar as propriedades da superfície tribológica de contato como um todo, por exemplo:

- elevar a resistência à corrosão/oxidação e reações químicas com o meio;
- minimizar a rugosidade controlando o mecanismo de crescimento do revestimento;
- obter relações de dureza e elasticidade ótimas nos revestimentos, de modo a evitar delaminação e desgaste abrasivo;
- otimizar as características de adesão na interface para evitar deslocamento; e
- condicionar as propriedades mecânicas do substrato para se aproximar das propriedades mecânicas do revestimento melhorando a adesão na interface.

Os revestimentos em sua maioria são compostos cerâmicos depositados como uma fina camada sobre a superfície das ferramentas. O processo de deposição



mais utilizado é a Deposição Física a Vapor (PVD – Physical Vapor Deposition). Neste processo as camadas usuais possuem entre 2 μm e 5 μm , podendo em casos especiais atingir até 15 μm de espessura. Os Revestimentos mais comuns, sua dureza e coeficiente de atrito são apresentados na Tabela 1. Verifica-se que os revestimentos possuem dureza muito superior a dos aços ferramenta temperados e revenidos, para trabalho a frio em torno de 600 HV – 700 HV, o que lhes confere uma maior resistência ao desgaste. Em conjunto, possuem baixo coeficiente de atrito diminuindo a força de atrito (F_A) que age no sistema em deslizamento e com isso diminuindo o desgaste.

Tabela 1. Principais características de revestimentos PVD

Revestimento	TiN	CrN	TiCN	TiAlN	HTS-V10®
Dureza (HV)	2.200	1.900	2.800	3.000	2.500
Coeficiente de Atrito	0,4	0,3 – 0,5	0,4	0,3 – 0,4	0,1

2 ESTUDOS DE CASOS – APLICAÇÃO

2.1 Keiper do Brasil Ltda.

Um conjunto de ferramentas da empresa Keiper do Brasil Ltda. foi selecionado para teste de desempenho em serviço com a utilização de revestimento HTS-V10®. Este revestimento foi desenvolvido especialmente para o setor de conformação e corte a frio possuindo baixo coeficiente de atrito (0,1) e dureza de 2.500 HV. As ferramentas foram construídas em aço Vanadis 23 temperados e revenidos para dureza média de 60 HRC. Após acabamento, as ferramentas foram polidas e limpas em um sistema de Ultra-Som para garantir o acabamento superficial e uma superfície isenta de contaminações. As ferramentas foram revestidas por processo PVD. Uma comparação de desempenho é apresentada na Figura 7.

Os resultados obtidos em serviço mostraram que o revestimento HTS-V10® elevou a vida da ferramenta em níveis muito superiores ao obtido com a mesma ferramenta sem revestimento. Ainda, comparando a vida após revestimento HTS-V10® com uma ferramenta anteriormente tratada com processo Dúplex (fornecido por outra empresa), nitretação seguido de revestimento TiN, a vida do revestimento HTS-V10® até o momento é o dobro do atingido anteriormente. É importante informar que a ferramenta revestida em HTS-V10® ainda se encontra em estado de uso aguardando nova campanha da peça fabricada.

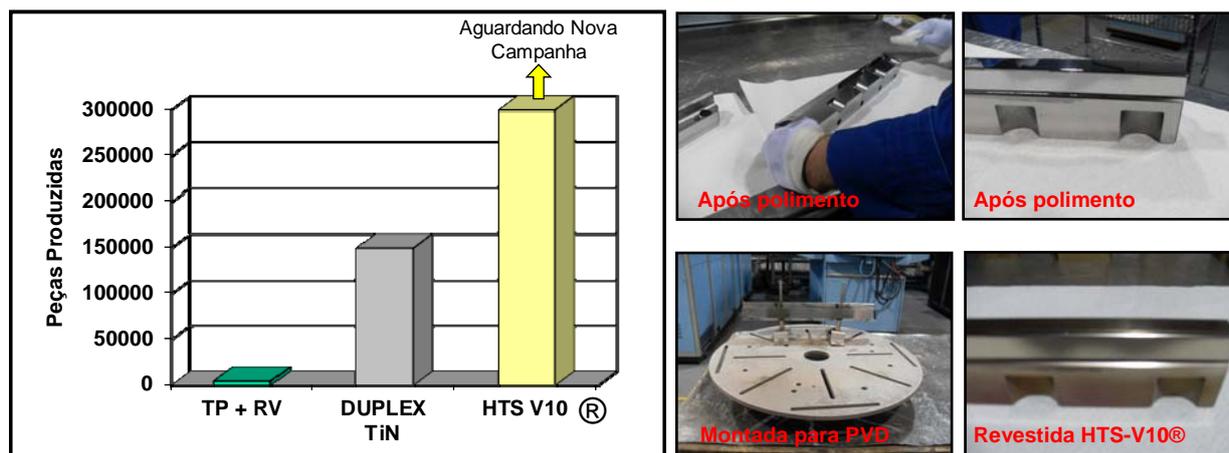


Figura 7. Resultado de desempenho de ferramenta da Keiper do Brasil Ltda.

2.2 Polimec Indústria e Comércio Ltda.

Em outra ferramenta, o revestimento HTS-V10® foi testado em um punção de extrusão inversa da empresa Polimec Ind. e Com. Ltda. Neste caso o punção trabalha na deformação de uma liga de alumínio onde o problema a ser solucionado com o revestimento é o acabamento superficial interno da peça (Figura 8), que se deteriora com o desgaste do punção. Diversos revestimentos, de diferentes fornecedores, foram testados e o problema passou a ser deslocamento do revestimento. Ou seja, os revestimentos não tiveram propriedade de adesão suficiente para suportar os esforços presentes no sistema tribológico. A substituição dos revestimentos pelo HTS-V10® mostrou-se eficiente em relação à adesão. O HTS-V10® não deslocou da superfície do punção e o desgaste apresentou apenas sulcamento (Figura 8), em fotografia da superfície do punção após trabalho (fornecida pela Polimec).



Figura 8. Resultado de desempenho de punção da Polimec Ind. e Com. Ltda.

2.3 Tratamento Dúplex

A tecnologia de engenharia de superfície na geração de “Superfícies Dúplex” combina os processos de Nitretação sob Plasma e Revestimento PVD e tem encontrado aplicação crescente na indústria como forma de elevar as propriedades tribológicas de componentes de aço.⁽⁴⁻⁸⁾ O tratamento dúplex consiste em obter uma

superfície onde o revestimento de elevada dureza é suportado por uma camada espessa e endurecida pelas reações de nitretação, diminuindo a diferença de propriedades mecânicas entre o revestimento e o aço ferramenta. Com isso se objetiva aumentar o tempo de residência do revestimento com o aumento na adesão promovido pelo suporte mecânico oferecido pela camada nitretada em comparação com ao aço apenas temperado e revenido. A nitretação sob plasma de apresenta como um processo versátil e seguro para eliminar a presença da camada branca que diminui a adesão dos revestimentos tribológicos.⁽⁹⁾

Um exemplo é mostrado para o sistema Dúplex gerado no aço AISI D2. Para isso se analisa a relação entre a Dureza e o Módulo de Elasticidade (E) dos dois componentes do sistema, substrato e revestimento, relação H/E. O efeito das propriedades mecânicas na adesão é determinado pelas cargas críticas de falha em ensaio de endentação *Rockwell C*, sendo *Lc1* a carga crítica para trincamento e *Lc2* a carga crítica de deslocamento.

Em estudos com aço AISI D2⁽¹⁰⁾ verificou-se que após a nitretação sob plasma a superfície do aço AISI D2 apresenta-se isento de camada branca. Para substratos apenas temperados e revenidos (~ 600 HV) e posteriormente nitretado sob plasma (~ 1.100 HV) foram depositadas por PVD camadas de revestimento TiN com espessura média de $6,92 + 0,17 \mu\text{m}$ e dureza média de $2.274,7 + 61,1 \text{ HV } 0,003$. A Figura 9 mostra claramente que a relação H/E do aço apenas temperado e revenido é a metade da do revestimento TiN e que o tratamento de nitretação eleva a relação H/E para um valor próximo ao encontrado para o TiN. Desta forma, a condição Duplex conduz a um aumento significativo das cargas necessárias para trincamento e deslocamento do TiN. Esta melhoria na adesão, resultado da melhor compatibilidade de propriedades mecânicas entre o revestimento e o substrato nitretado, conduzirá a um maior tempo de residência do revestimento em serviço.

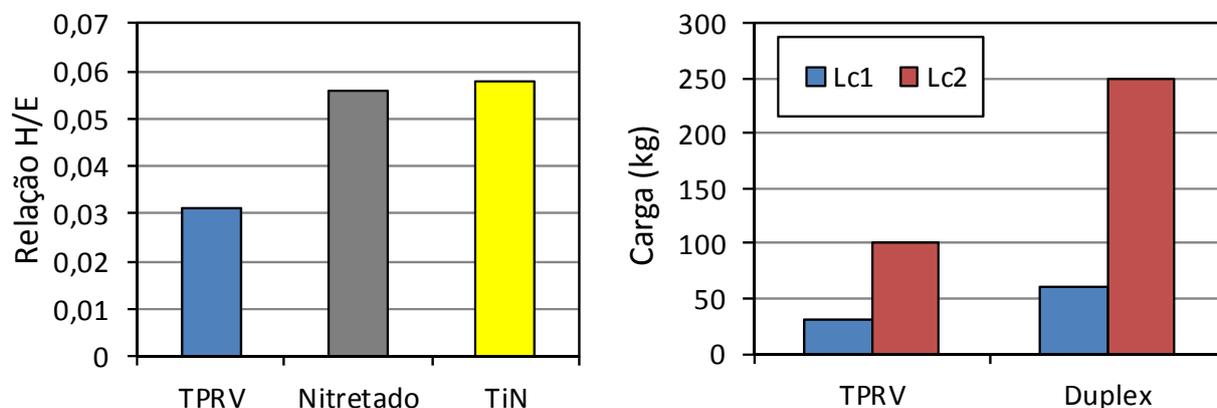


Figura 9. Propriedades mecânicas dos sistemas estudados e desempenho do revestimento TiN sobre substratos temperados e revenidos (TPRV) e nitretado sob plasma (Duplex).⁽¹⁰⁾

3 CONCLUSÕES

Ferramentas para trabalho a frio estão sujeitas a condições severas de desgaste que exigem o uso de tratamentos superficiais para satisfazer as necessidades tribológicas em serviço e elevar seu desempenho em busca de um aumento de vida. Os revestimentos tribológicos por PVD com elevada dureza associada ao baixo coeficiente de atrito são uma alternativa viável para aumentar o desempenho de ferramentas de corte e conformação.



Os estudos de caso aqui apresentados mostram que o revestimento tipo HTS-V10® mostrou-se eficiente para elevar a vida de ferramenta de conformação a frio de aços, tanto com relação à adesão e desgaste. Na extrusão inversa de liga de alumínio este revestimento foi eficiente em mostrar uma adesão superior aos comumente utilizados.

O uso do processo Dúplex, de nitretação sob plasma seguida de revestimento PVD se apresenta como uma alternativa eficiente para elevar as características de adesão do revestimento por efeito da compatibilização das propriedades mecânicas na superfície do substrato às do revestimento de TiN.

REFERÊNCIAS

- 1 Holmberg, K., Matthews, A.; **Coatings Tribology**, Ed. Elsevier, UK, 2a Edição, 560 p., 2009.
- 2 Sinatora, A., Tschiptschin, A.P.; Propriedades de Superfície de Filmes e Camadas, **Metalurgia e Materiais**, v. 60, n. 543, p. 164-166, 2004.
- 3 Mubarak A., Hamzah, E.B., Mohd Toff M.R. HJ.; Effect of Metal Ion Etching On The Tribological, Mechanical and Microstructural Properties of TiN-Coated D2 Tool Steel Using CAE PVD Technique, **Surface Review and Letters**, v. 13, n. 4, p. 413-421, 2006.
- 4 Schulz A.; Stock H.-R.; Mayr P.; Staeves J.; Schomoeckel D. "Deposition and Investigation of TiN PVD Coatings on Cast Steel Forming Tools", **Surface and Coatings Technology**, v. 94-95, p. 446-450, 1997.
- 5 Dingremont N.; Bergmann E., Collignon P.; Michel H., "Optimization of Duplex Coatings Built from Nitriding and Ion-Plating with Continuous Operation for Construction and Hot Working Steels", **Surface and Coatings Technology**, v. 72, p. 163-168, 1995.
- 6 Vetter J.; Michler T.; Steuernagel H., "Hard Coatings on Thermochemically Pretreated Soft Steels: Application Potential for Ball Valves", **Surface and Coatings Technology**, v.111, p. 210-219, 1999.
- 7 Sun Y.; Bell T., "Plasma Surface Engineering of Low Alloy Steel", **Materials Science and Engineering A**, v. 240, p. 419-434, 1991.
- 8 Franco Jr, A.R., Pinedo, C.E., Tschiptschin, A.P.; Utilização da Nitretação sob Plasma como Pré-Tratamento ao Revestimento TiN-PVD na Geração de Superfícies Dúplex no Aço AISI H13, **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 5, p. 179-185, 2009.
- 9 Podgornik, B., Hogmarka, S., Sandberg, O., Leskovsek, V.; Wear Resistance and Anti-sticking Properties of Duplex Treated Forming Tool Steel, **Wear**, v. 254, p. 1113-1121, 2003.
- 10 Franco Jr, A.R., Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD-TiN em Aços Ferramenta AISI D2 e AISI H13, **Tese de Doutorado**, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 178 p., 2003.