

UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS TRIBOLÓGICOS EM FERRAMENTAS PARA TRABALHO A FRIO¹

Rosen Tovbin²
Carlos Eduardo Pinedo³

Resumo

Ferramentas fabricadas em aços para trabalho a frio estão sujeitas a solicitações intensas que requerem, do corpo, propriedades otimizadas de resistência mecânica e à fratura. Não obstante, a superfície de trabalho sofre elevadas solicitações, que dependem do sistema tribológico presente. Assim, o sistema de trabalho na região de contato ferramenta/contra-corpo requer considerações especiais na busca da melhor solução. Na maioria dos casos estas solicitações de desgaste e adesão são combatidas pelo uso de tratamentos superficiais; em geral revestimentos, que aumentem a dureza da superfície. Embora em muitos casos este procedimento conduza a uma solução, em sistemas mais complexos a elevada dureza superficial não satisfaz as necessidades. Este trabalho procura esclarecer a influência de diferentes propriedades dos revestimentos como; coeficiente de atrito, estabilidade térmica, e propriedades mecânicas no desempenho de ferramentas para trabalho a frio, incluindo exemplo de aplicação e desempenho.

Palavras-chave: revestimento, nitretação sob plasma, superfície dúplex, desgaste.

USE OF TRIBOLOGICAL COATINGS FOR COLD WORK TOOL STEELS¹

Abstract

Tooling for cold work is subjected to high stresses requiring from bulk material special properties on strength and toughness. However, tool surface is in a more complex tribological system, requiring special considerations on best solution for the contact work interface between the bodies. Surface treatments are often used for such tools, as coatings to increase surface hardness, um many cases the first and unique point of view. This work will try to approach the problem, looking for best solutions considering other important coating properties such as; friction coefficient, temperature stability, structure and mechanical properties. A case study is presented.

Key words: coatings, plasma nitriding, duplex surface, wear

¹ Trabalho apresentado ao "7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes da ABM", 15 e 16 de julho de 2009, São Paulo/SP.

² Sputtek Thin Films and Hard Coatings Ltd, Toronto/Canada.

³ Membro da ABM. Heat Tech - Tecnologia em Tratamento Térmico e Engenharia de Superfície Ltda.

1. Introdução

Ferramentas fabricadas em aços para trabalho a frio estão sujeitas a solicitações intensas que requerem, do corpo, propriedades otimizadas de resistência mecânica e à fratura. Entretanto, a vida das ferramentas é fortemente determinada pelas solicitações presentes na superfície de trabalho e da influência do desempenho desta na qualidade do produto fabricado. A superfície de trabalho sofre solicitações diferenciadas, dependentes do sistema tribológico presente. Em geral, este sistema deve contemplar; as tensões atuantes nos de dois corpos em movimento relativo, tipo de lubrificação, presença de terceiro corpo na forma de partícula, geometria da área de contato, plasticidade do corpo em deformação, seqüência de deformação em operações múltiplas, entre outros. Assim, o sistema se mostra bastante complexo e requer considerações especiais na busca da melhor solução.

Na maioria dos casos estes problemas são encarados de forma simplista, ou seja, pelo uso de tratamentos superficiais, em geral revestimentos, que aumentem a dureza da superfície. Embora em muitos casos este procedimento conduza a uma solução, em sistemas mais complexos a elevada dureza superficial não satisfaz as necessidades. Este trabalho procura esclarecer a influência de diferentes propriedades dos revestimentos como; coeficiente de atrito, coeficiente de expansão térmica, estabilidade térmica, estrutura e propriedades mecânicas no desempenho de ferramentas para trabalho a frio, incluindo diferentes exemplos de aplicação e desempenho. Também serão discutidas as combinações de tratamentos superficiais como meio de otimizar as propriedades da superfície.

2. Considerações Tribológicas

Entende-se por tribologia a ciência que estuda as condições de interação entre superfícies em movimento relativo. A tribologia aborda principalmente os fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste. Quando duas ou mais superfícies se movem uma(s) contra a(s) outra(s) o desgaste estará presente, resultando na perda de material de um ou mais corpos durante o processo. No caso de ferramentas, este desgaste promove o final de vida pela perda de tolerâncias dimensionais ou, em extremo, da geometria da ferramenta. Uma das formas de atenuar o desgaste é o controle das condições de atrito e lubrificação.

É importante definir o atrito como sendo a força de resistência (F) ao movimento de uma superfície sobre a outra e o coeficiente de atrito (μ) a relação entre a força normal aplicada (W) e a força tangencial de deslizamento, Figura 1.

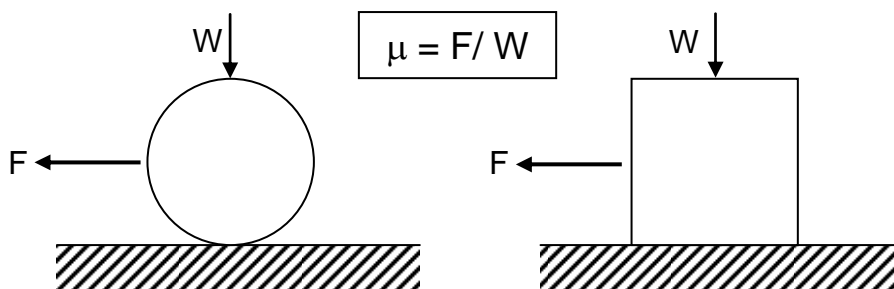


Figura 1. Forças envolvidas no movimento de dois corpos [1].

Para que ocorra a redução do atrito deve-se reduzir a força tangencial de deslizamento na deformação e com isso diminuir a intensidade do desgaste. Ou seja, o movimento relativo entre os corpos (ferramenta/peça) deve ocorrer sob menores níveis de tensão tangencial, ou de maneira mais fácil.

É universalmente conhecido que o uso de lubrificantes, sólidos ou líquidos, entre superfícies em contato é um método eficiente para reduzir a força de atrito, o desgaste e as perdas de energia no sistema [2]. Por isso quase a totalidade das operações de trabalho a frio é conduzida sob intensa lubrificação. O objetivo da lubrificação é separar superfícies com movimento relativo pela introdução de um material de baixa compressibilidade, criando um filme que minimiza o contato e com isso minimiza o desgaste [3].

Outra variável importante é o condicionamento da qualidade superficial, ou seja, da “rugosidade”. Durante o processo de conformação, as asperidades do corpo e contra corpo deslizam umas contra as outras no processo de deslizamento. No início do processo, quando a ferramenta esta em contato apenas com os picos das asperidades, o atrito depende da distribuição dos picos, da sua altura e característica de deformação. Com a continuidade do trabalho, os picos são minimizados, a superfície torna-se mais plana, a área de contato aumenta e as condições de atrito são modificadas. Avaliações recentes mostram que o coeficiente de atrito aumenta com a diminuição da rugosidade, já que a área de contato é menor [4,5].

Os principais tipos de desgaste são; abrasão, adesão, erosão e corrosão, podendo em uma ferramenta se encontrar mais de um destes tipos presentes em serviço.

A Figura 2 mostra esquematicamente as principais variáveis envolvidas no contato de dois corpos em movimento relativo.

- As características de processo são, em um primeiro passo, determinantes para a dinâmica do sistema tribológico, pois, por exemplo, define a força aplicada (normal) e com isso a força de atrito, pela geometria da ferramenta define as condições de escoamento do contra-corpo, o uso de lubrificantes e o acabamento superficial atuam no coeficiente de atrito.
- Nas características da superfície a topografia, rugosidade e sua distribuição tridimensional atuam no contato das asperezas entre ferramenta e contra-corpo modificando as condições de atrito. Também, as propriedades mecânicas do substrato, relacionadas ao tratamento térmico e superficial prévios, devem ser consideradas, pois alteram as características de interação com o revestimento e com o contra-corpo. Não menos importante é a correta seleção do revestimento para a melhor acomodação ao substrato. A natureza das superfícies, juntamente com o lubrificante, determina as condições de atrito.
- Tribologicamente são geradas características importantes, que determinam a intensidade de desgaste e com isso a vida da ferramenta. Em verdade, as características tribológicas (output) são o produto da interação entre os parâmetros operacionais (input) com as características das superfícies.

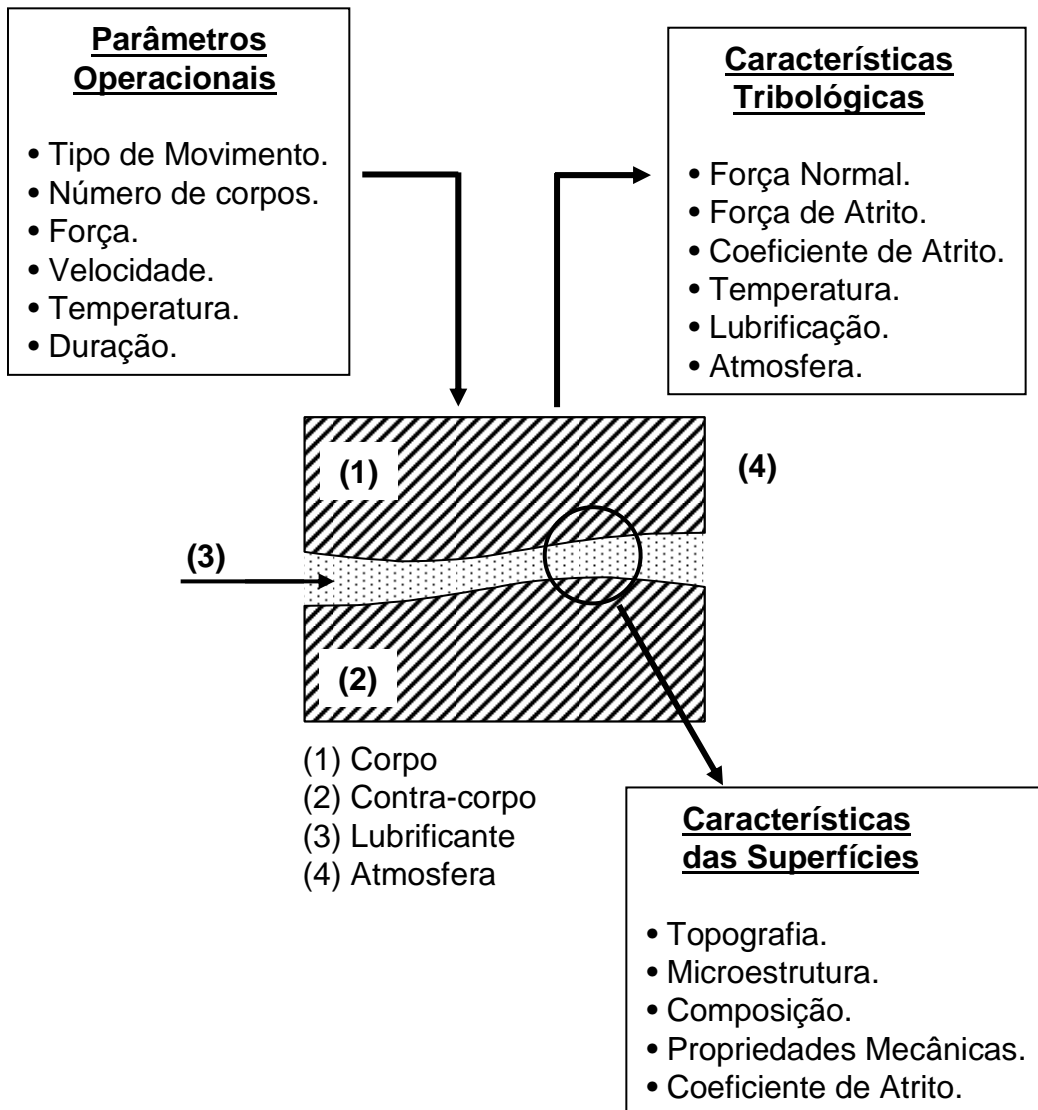


Figura 2. Principais características de um sistema tribológico.

3. Tribologia de Superfícies Revestidas

De uma forma geral, as propriedades mais esperadas de um revestimento são; o baixo coeficiente de atrito e elevada dureza. Espera-se com esta combinação poder diminuir sensivelmente a taxa de desgaste. De acordo com Holmberg e Mathews [6,7] o controle do processo de desgaste no contato de superfícies revestidas deve ser analisado por dois pontos de vista principais:

- **macro-mecânico**, controlado basicamente por: (i) relação entre a dureza do substrato e do revestimento, um revestimento duro sobre um substrato mole diminui o atrito e o desgaste pela minimização dos efeitos de deformação (ii) espessura do revestimento, em revestimentos mais espessos as cargas são suportadas pelo revestimento e protegem o substrato, mas em revestimentos muito finos a deformação do substrato pode causar o trincamento e deslocamento do revestimento, (iii) rugosidade, que pode reduzir a área real de contato entre as duas partes e (iv) presença de partículas originadas externamente ou por um produto de desgaste do sistema que podem agravar as condições de desgaste.
- **micro-mecânico**, considerado como aqueles fenômenos que ocorrem no nível de dimensão de 1 μm ou menos, o desgaste é controlado pela condição de tensão-deformação presente no contato das asperezas, a geração e propagação de trincas com remoção material e liberação de partículas que produzem a formação de riscos e crateras.

4. Revestimentos

O custo das ferramentas pode representar uma fração importante do preço final do produto, portanto, é muito importante aumentar ao máximo a vida das ferramentas com o objetivo de diminuir o custo de fabricação pelo aumento na produtividade. Uma das alternativas é a escolha do material e do tratamento térmicos mais apropriados para a ferramenta.

Em conjunto, o uso de revestimentos protetores tem sido objeto de intenso desenvolvimento nos últimos 20 anos, desde a introdução em larga escala do revestimento de Nitreto de Titânio-TiN por processo de deposição Física a Vapor PVD-(Physical Vapour Deposition) em meados da década de 80, do século passado. Estes revestimentos têm como características principais a; elevada dureza, baixo coeficiente de atrito, estabilidade térmica e coloração característica. A combinação destas propriedades fornece à superfície das ferramentas propriedades tribológicas otimizadas que permite um considerável aumento do desempenho em serviço.

Desenvolvido inicialmente para ferramentas de corte por remoção de cavaco, contínuo ou intermitente, atualmente os revestimentos têm sido aplicados em todos os tipos de ferramentas e solicitações, que incluem, por exemplo: corte e conformação a frio, forjamento a quente, fundição sob pressão, entre outros.

Atualmente existem diferentes tipos de processos PVD, como: "*magnetron sputtering*", evaporação a laser, arco catódico, feixe de elétrons, etc. Em todos, a atmosfera é de vácuo, temperatura de processo varia de 200° a 500°C e a espessura da camada é da ordem de poucos micrometros. A Tabela 1 apresenta os revestimentos mais utilizados pela indústria de ferramentas. Estes são baseados em

nitretos de metais de transição, como o TiC e CrN, mas revestimentos multicomponentes tem sido utilizados de forma crescente na última década, como o TiAlN e TiCN. Ainda, sistemas multicamadas e nanoestruturadas são os mais modernos desenvolvimentos.

Tabela 1. Principais revestimentos e suas características.

Tipo	Espessura (μm)	HV50	Coefficiente de Atrito	Estabilidade Térmica ($^{\circ}\text{C}$)	Cor do Revestimento
TiN	2 a 5	2200	0,4	600	dourado
CrN	2 a 10	1900	0,3-0,5	700	prata
ZrN	2 a 5	2500	0,3-0,4	600	amarelo
TiCN	2 a 5	2800	0,4	400	prateado
TiAlN	2 a 5	3000	0,3-0,4	900	violeta-cinza
HTS V-10®	3 a 15	2500	0,1	600	amarelo

® Marca Registrada

A Figura 3 mostra uma camada de revestimento PVD de TiN sobre superfície de aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2. A espessura média e o coeficiente de atrito medido para esta camada são indicados, e encontram-se dentro do apresentado na Tabela 1.

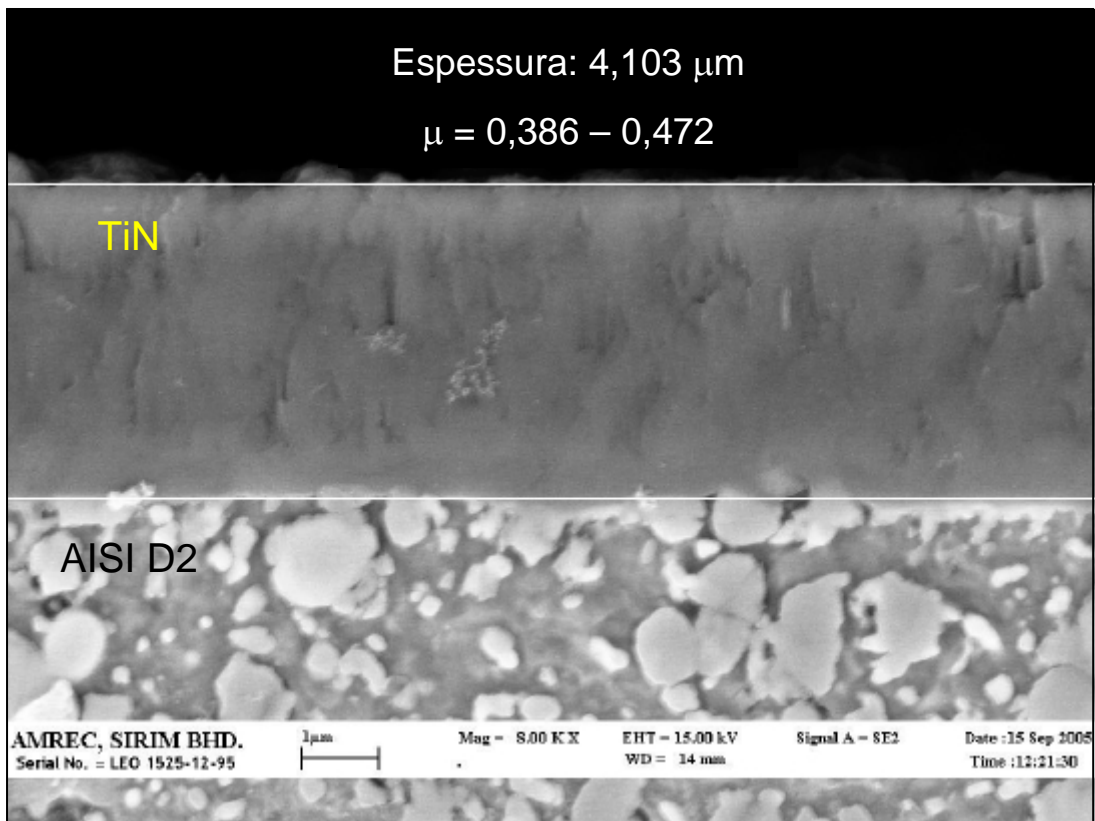


Figura 3. Filme de TiN depositado sobre aço AISI D2 [8].

5. Estudo de Caso

A Tabela 1 apresenta o revestimento HTS-V10[®] que se propõe a atingir um aumento significativo de vida em ferramentas de corte para trabalho a frio. Este desempenho do revestimento e, por consequência, da ferramenta, é atingido pela combinação de sua espessura, dureza e, principalmente, coeficiente de atrito inferior aos dos revestimentos convencionais.

O coeficiente de atrito do revestimento HTS-V10[®] foi determinado por ensaio pino-contra-disco modificado. Neste ensaio foram revestidos pinos de carbeto de tungstênio, 70 HRC, que rotacionaram entre dois discos de aço AISI 4340. Foram conduzidos ensaios na temperaturas entre 20 e 500°C e a força normal aplicada foi 1850 MPa. A Figura 4 mostra que o valor obtido para o coeficiente de atrito é inferior ao dos revestimentos convencionais e que a variação no coeficiente de atrito com a temperatura é mínima. Estes resultados são extremamente importantes para o controle de desgaste, principalmente em operações a frio, minimizando os efeitos de adesão e na manutenção do fluxo de material na cavidade, mesmo com o eventual aumento de temperatura durante a operação da máquina.

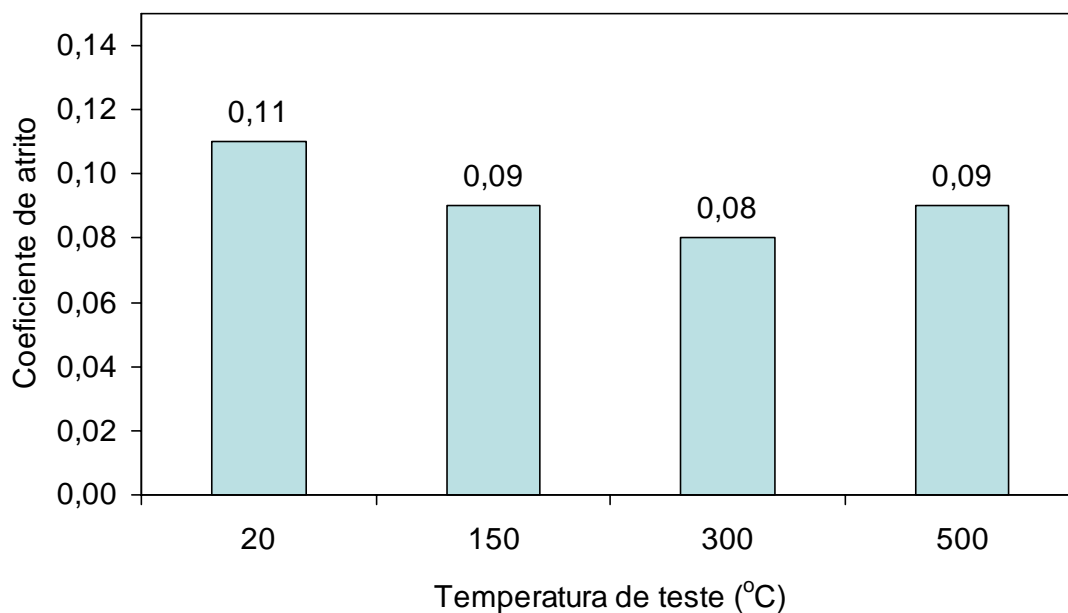


Figura 4. Variação do coeficiente de atrito do revestimento HTS-V10 em função da temperatura de teste.

Uma ferramenta para conformação a frio, fabricada em segmentos, com aço ferramenta AISI D2, previamente temperado e revenido para 58-60 HRC, foi revestida com HTS-V10[®], Figura 5. Em operação a ferramenta conforma chapa de aço com 2,9 mm de espessura. Comparando o desempenho deste revestimento com o PVD-TiCN verifica-se que o aumento de vida na deposição do revestimento HTS-V10[®] é mais de dez vezes superior ao TiCN.



Figura 5. Segmento de ferramenta de conformação a frio recoberta com HTS-V10®.

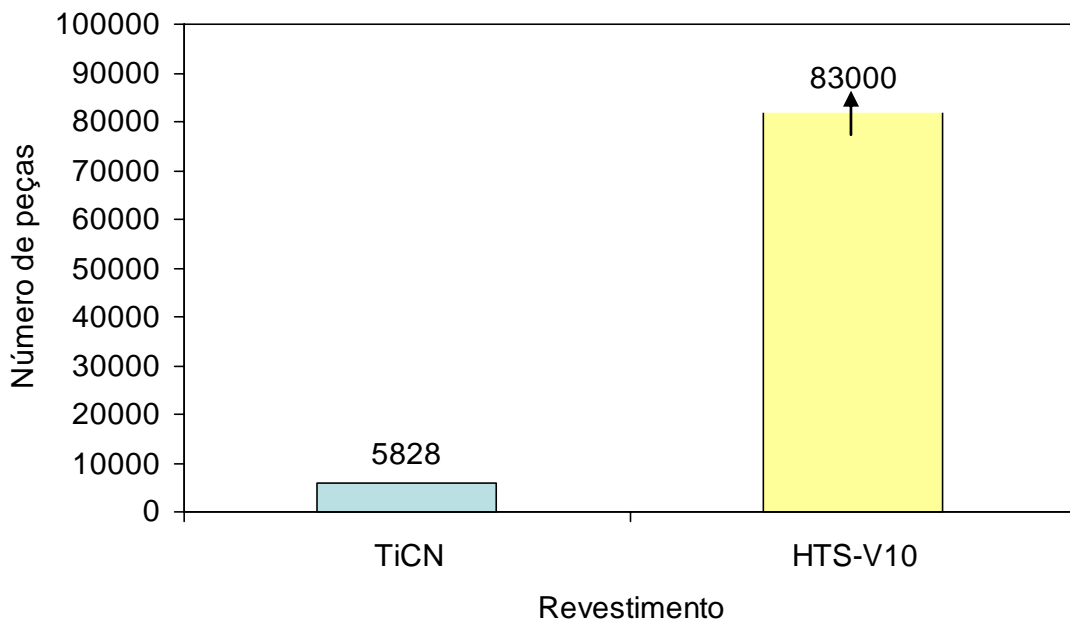


Figura 6. Rendimento de segmentos mostrados na Figura 5 com diferentes tratamentos superficiais.

Superfície Duplex

A adesão dos revestimentos aos substratos de aço ferramenta é dependente da diferença de dureza existente entre estes. No caso do aço AISI D2 o substrato é temperado e revenido para cerca de 60 HRC, ou aproximadamente 700 HV, e o revestimento, por exemplo de PVD-TiN, possui dureza de aproximadamente 2.200 HV. Nestas condições a adesão do revestimento fica comprometida, pois a interface substrato/revestimento é instável sob elevadas cargas. Uma opção para otimizar a adesão do revestimento a ferramenta é o uso do tratamento de pré-nitretação sob plasma [9,10]. Com a pré-nitretação é gerada uma camada que

suporta as cargas impostas à superfície, minimiza o trincamento do revestimento, e eleva a adesão, minimizando o deslocamento ou delaminação. É importante salientar que a camada nitretada deve obrigatoriamente ser isenta de Camada de Compostos, Camada Branca.

A Figura 7 apresenta a variação da dureza superficial no aço AISI D2 após nitretação sob plasma, na qual se verifica um aumento na dureza superficial para até 1.300 HV e que o aumento no tempo de nitretação diminui o potencial de endurecimento máximo. O reflexo deste endurecimento superficial é verificado na Figura 8, onde a carga necessária para o trincamento ($Lc1$) e para o deslocamento ($Lc2$) atingem o valor máximo para o endurecimento máximo. Mesmo assim, a pré-nitretação sempre eleva a adesão do revestimento.

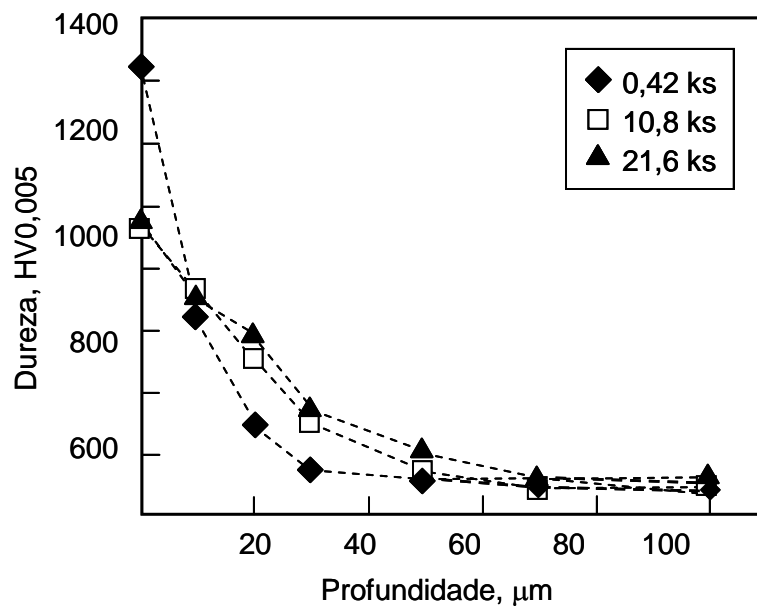


Figura 7. Perfil de endurecimento do aço AISI D2 após nitretação sob plasma.

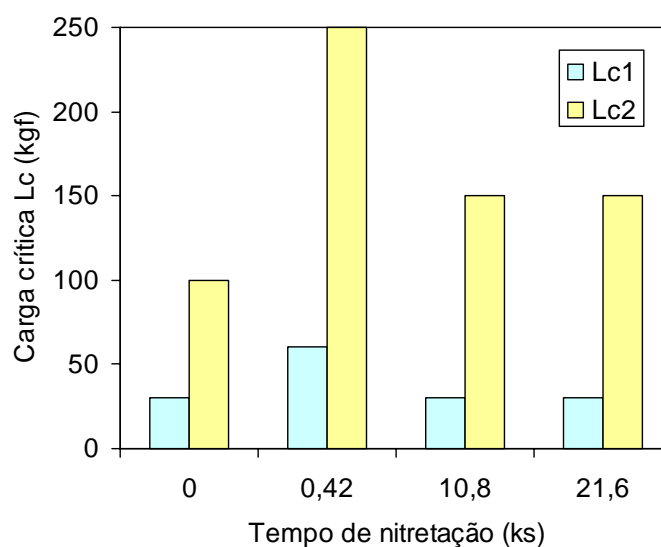


Figura 8. Adesão do revestimento PVD-TiN antes e após a nitretação sob plasma.

Conclusão

Operações de trabalho a frio exigem mais das ferramentas do que a resistência mecânica do corpo que as compõe pode oferecer. Principalmente quando resistência ao desgaste e adesão são um fator determinante, e geralmente o são. A análise do sistema tribológico, ou das solicitações a que as superfícies das ferramentas estão sujeitas é muito importante para procurar os melhores métodos de diminuição do desgaste e adesão, seja por uso de lubrificação, por controle de rugosidade, por ajuste de geometria, uso de revestimentos ou pelo conjunto destas medidas. Os revestimentos são uma opção viável para aumentar a vida de ferramentas para trabalho a frio, pois oferecem uma superfície de elevada dureza, baixo coeficiente de atrito e boa estabilidade térmica. A combinação de tratamentos superficiais, como a nitretação sob plasma e os revestimentos duros são uma opção viável para um incremento ainda maior das propriedades de desgaste e adesão da superfície e para a elevação da vida destas ferramentas.

REFERÊNCIAS

1. HUTCHINGS, I.M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Ed Edward Arnold, 1992.
2. KUSNETZOV, A. Ye., Effect of fluid lubricant on the contact characteristics of rough elastic bodies compression, *Wear*, v. 102, 177-194, 1985
3. JONES JR, W.R., Boundary Lubrication, in *Tribology: the Story of Lubrication and Wear*, NASA Technical Memorandum 101430, pp.: 23-54, 1985.
4. SAHIN, M., CETINARSLAN, C. S., AKATA, H.R., Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials, *Materials & Design*, v. 28, 633-640, 2007.
5. KARPENKO, Y.A., AKAY, A., A numerical model of friction between rough surfaces, *Tribology International*, v. 34, 531-545, 2001.
6. HOLMBERG, K., MATHEWS, A., Coatings tribology: a concept, critical aspects, and future directions, *Thin Solid Films*, v. 253, 173-178, 1994.
7. HOLMBERG, K., MATHEWS, A., Coatings tribology: contact mechanism and surface design, *Tribology International*, v. 31, 107-120, 1998.
8. ALI, M., HAMZAH, E.B., Effect of metal ion etching on the tribological, mechanical and microstructural properties of TiN-coated D2 steel using CAE PVD technique, *Surface Review and Letters*, v. 14, 413 – 421, 2006.
9. FRANCO JR. A.R., PINEDO, C.E., TSCHIPTSCHIN, A.P., Influence of the plasma nitriding pre-treatment on wear and adhesion of PVD/TiN Coating”, In 7th International Tooling Conference, 2-5 May, Torino/Italy, pp.: 457-463, 2006.
10. 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 Metalúrgica e de Materiais*, v. 5, p. 179-185, 2009.