



FURAÇÃO DE UMA LIGA Al-Si COM BROCAS DE AÇO-RÁPIDO REVESTIDAS

Rhander Viana

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – (UFU); Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica, CEP: 38400-902 – Uberlândia – MG, Brasil
rviana@mecanica.ufu.br

Álison Rocha Machado

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – (UFU); Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica, CEP: 38400-902 – Uberlândia – MG, Brasil
alissonm@mecanica.ufu.br

Resumo: Com a finalidade de melhorar o desempenho dos processos de usinagem, diversas operações são atualmente realizadas com o uso de ferramentas revestidas. Os revestimentos, em geral, melhoram as condições de corte na interface cavaco-ferramenta e aumentam a resistência das ferramentas ao desgaste, permitindo um aumento em sua vida útil. Neste trabalho os revestimentos TiN/TiCN, TiAlN, TiN/TiAlN e TiN/TiAlN/WCC foram testados na furação da liga de alumínio-silício ISO 3522 Al-Si8Cu3Fe de uso automobilístico, comparando o desempenho destes entre si e com a ferramenta sem revestimento. Os critérios de avaliação das ferramentas foram vida da ferramenta expressa em número de furos usinados, força de avanço e ensaio de adesividade de revestimentos através de indentação Rockwell C. Os resultados mostraram que as ferramentas revestidas produziram melhor desempenho em termos de vida da ferramenta, comparado à ferramenta sem revestimento. A ordem de desempenho dos revestimentos foi a seguinte: TiN/TiCN, TiN/TiAlN/WCC, TiAlN e TiN/TiAlN. Os resultados também mostraram que a força de avanço foi pouco influenciada pelos revestimentos. Quanto aos ensaios de adesividade, foi observado que os revestimentos TiN/TiCN e TiAlN mostraram melhor adesividade sobre o substrato de aço-rápido classe M2.

Palavras-chave: revestimentos, furação, liga alumínio-silício, adesividade, aço-rápido.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a aplicação de revestimentos para ferramentas de corte surgiu na década de 1960 com o processo de deposição CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e tomou grande impulso com o desenvolvimento do PVD (*Physical Vapor Deposition*), o qual possibilitou a utilização de temperaturas mais baixas de deposição de filmes, e conseqüentemente o uso de revestimentos numa gama maior de substratos, como o aço-rápido.

Nas ferramentas de corte para usinagem os revestimentos conferem uma excepcional combinação de propriedades como estabilidade química, dureza elevada mesmo a altas temperaturas, resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito, de modo que através de sua aplicação obtêm-se significativos aumentos na vida útil das ferramentas e como conseqüência redução nos custos de produção. De acordo com os valores de mercado mais de 40 % de todas as ferramentas de corte utilizadas na indústria atual são revestidas. E sua participação vem crescendo continuamente, mas as diferentes ferramentas e operações de corte necessitam de diferentes revestimentos (Cselle and Barimani, 1995). Por isso diversos trabalhos são desenvolvidos com o intuito de determinar o desempenho de revestimentos em ferramentas de corte em variadas operações de usinagem e condições de corte apropriadas.

Atualmente o desenvolvimento e a implementação de novos revestimentos estão focados numa combinação de novos materiais e microestruturas, passando pelas estruturas binárias (Ex: TiN), ternárias (Ex: TiAlN) e atualmente as quaternárias (Ex: TiAlCrN). Além dos revestimentos multicamadas graduais que oferecem além de elevada dureza uma boa tenacidade, com cada revestimento podendo ter até 1000 camadas e cada uma com espessura de 1-2 nm (Pflüger et al, 1999). O desenvolvimento dos chamados lubrificantes sólidos como o WCC, MoS₂ e DLC (*Diamond Like Carbon*), também é outro campo de pesquisa bastante explorado, pois há sempre a preocupação de uma usinagem que não agrida o meio ambiente, ou seja, sem o uso de fluido de corte.

Pode-se afirmar categoricamente que essas novas tecnologias conduzem a obtenção de revestimentos melhorados que são especialmente apropriados para condições de trabalho muito exigentes e para ambientes altamente agressivos. Como a usinagem de ligas de alumínio-silício que pela concentração do silício pode causar o excessivo desgaste da ferramenta, como consequência do mecanismo de desgaste abrasivo. Essas ligas são especialmente utilizadas na fabricação de componentes automotivos como cabeçotes de motores, coletores de admissão e caixas de câmbio. E poucas são as pesquisas na usinagem destas ligas com ferramentas revestidas principalmente na furação.

Em vista disso este trabalho em parceria com FIAT - Powertrain tem o objetivo de estudar o desempenho dos revestimentos TiN/TiCN-multicamadas, TiAlN-monocamada, TiN/TiAlN-duplacamada e TiN/TiAlN/WCC-triplacamada na furação da liga alumínio-silício ISO 3522 Al-Si8Cu3Fe em ensaios de vida, ensaios de força de avanço e ensaios de caracterização dos revestimentos por indentação Rockwell C.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais adotados para a realização dos ensaios de vida, ensaios de força de avanço e ensaios de caracterização dos revestimentos por indentação Rockwell C são apresentados a seguir:

2.1. Ensaios de Vida

Os ensaios de vida foram realizados na linha de produção da FIAT - Powertrain em etapas de 1000 a 4000 furos e depois até atingir o fim de vida das ferramentas.

O objetivo destes ensaios foi determinar o número máximo de furos realizados para cada grupo de ferramentas testadas. O critério de fim de vida foi baseado na qualidade do furo usinado, utilizando para isso um calibre passa-não-passa com diâmetro passa de 8,647 mm e não-passa de 8,912 mm com quatro a cinco medições a cada hora de produção. A medida da vida da ferramenta foi dada pelo número de furos usinados até atingir o critério. Essa metodologia é utilizada pela linha de produção para o teste de ferramentas.

A operação de furação foi realizada utilizando-se uma linha *Transfer* de produção seriada. As peças usinadas foram carcaças da caixa de câmbio confeccionadas na liga alumínio-silício ISO 3522 Al-Si8Cu3Fe, utilizando-se três brocas de cada revestimento estudado além de três brocas sem revestimento. Todos os ensaios foram realizados com fluido de corte. A figura 1 mostra as carcaças usinadas e as ferramentas testadas.

As condições de corte utilizadas na linha de produção e as características dos revestimentos testados são dados nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

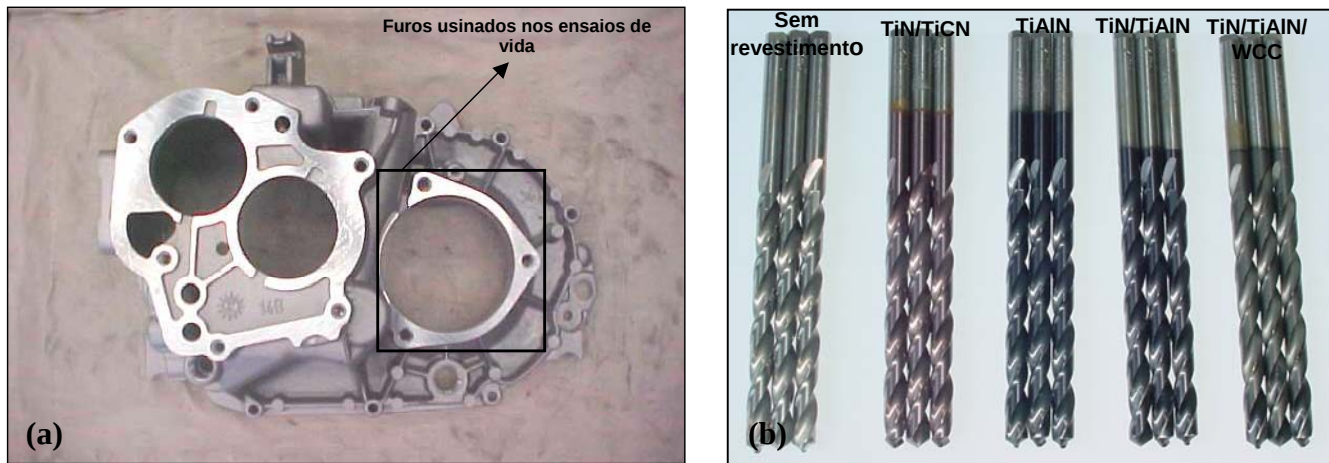


Figura 1 – Em (a) carcaça da caixa de câmbio usinada, e em (b) ferramentas utilizadas nos ensaios de vida.

Tabela 1: Condições de corte nos ensaios de vida.

Diâmetro da broca de HSS	8,7 mm
Velocidade de corte - (v_c)	43 m/min
Velocidade de avanço - (v_f)	187,5 mm/min
Percurso de avanço - (l_f)	33 mm

Tabela 2: Características dos revestimentos testados.

Revestimento	* Espessura da camada	* Microdureza do revestimento
TiN/TiCN	3 μm	$\approx 3000 \text{ HV}_{250}$
TiAlN	3 μm	$\approx 3300 \text{ HV}_{250}$
TiN/TiAlN	6 μm	$\approx 3000 \text{ HV}_{500}$
TiN/TiAlN/WCC	8 μm	$\approx 3000 \text{ HV}_{500}$

* Dados dos fabricantes

2.2. Ensaio de Força de Avanço

Neste ensaio o objetivo foi avaliar o desempenho dos revestimentos testados quanto à força de avanço com as ferramentas novas e à medida que as ferramentas eram desgastadas nos ensaios de vida. Os furos foram realizados em cheio em corpos de prova nas dimensões 250x100x40 mm confeccionados na liga ISO 3522 Al-Si8Cu3Fe, nas mesmas condições de corte dos ensaios de vida, com exceção para o percurso de avanço que foi de 20 mm.

A força de avanço foi adquirida através de um dinamômetro da marca KISTLER INSTRUMENT, modelo 9265, que constitui de uma base piezoelétrica, montada sobre a mesa do centro de usinagem ROMI BRIDGEPORT (Discovery 760), figura 2, e de um amplificador de sinal ajustado de acordo com a sensibilidade dos cristais piezoelétricos na direção correspondente de solicitação. Os sinais provenientes do amplificador são recebidos, convertidos e armazenados em um microcomputador que contém uma placa de aquisição NI-DAQ PCI-6035E da National Instruments e um *Software* LABVIEW 6.2[®]. A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 1000

pontos por segundo durante um tempo de usinagem de 10 segundos, sendo realizados três furos para cada ferramenta do grupo. Com um total de 10000 pontos adquiridos obteve-se a média dos valores de força de avanço tomada para os 9 furos realizados para cada grupo de ferramentas.

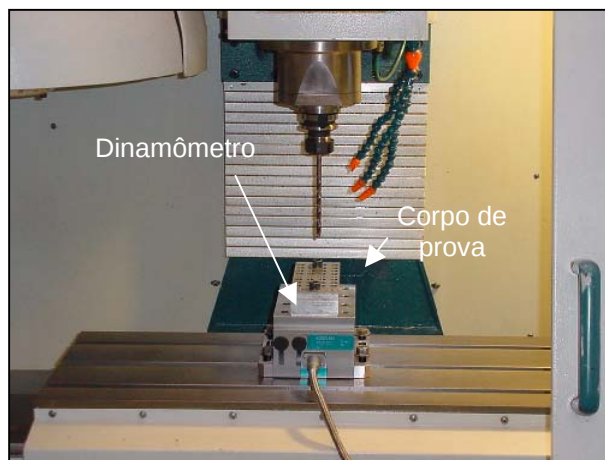


Figura 2 – Metodologia de montagem dos equipamentos nos ensaios de força de avanço.

2.3. Ensaios de Caracterização de Revestimentos por Indentação Rockwell C

Este ensaio tem o objetivo de avaliar qualitativamente a adesividade do revestimento sobre o substrato de HSS. Para isso foram realizadas duas indentações em cada ferramenta em posições diametralmente opostas numa região plana da haste cilíndrica com um durômetro, carga de 150 kgf (1470 N) e um penetrador Rockwell C cone esférico de diamante com ângulo de 120° no vértice e ponta esférica com um raio de 0,002 mm (NORMA DIN 50103 e ASTM E 18-42). As impressões deixadas pela indentação foram visualizadas e fotografadas com a utilização de um microscópio ótico com aumento de 40 vezes, e uma máquina digital. Na figura 3 é mostrada a região de indentação nas brocas. Todas as brocas revestidas foram ensaiadas.

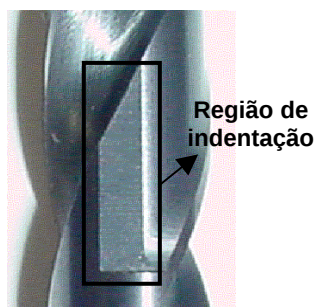


Figura 3 – Região de indentação das brocas numa região plana da haste cilíndrica.

3. RESULTADOS

3.1. Ensaios de Vida

A figura 4 mostra a quantidade de furos usinados para cada grupo de ferramentas. Os resultados demonstram que o uso de revestimentos para esta operação aumentou o desempenho das ferramentas em relação às ferramentas sem revestimento. As brocas revestidas de TiN/TiCN obtiveram o melhor desempenho, aumentando a produtividade do número de furos em 252% em comparação as brocas sem revestimento.

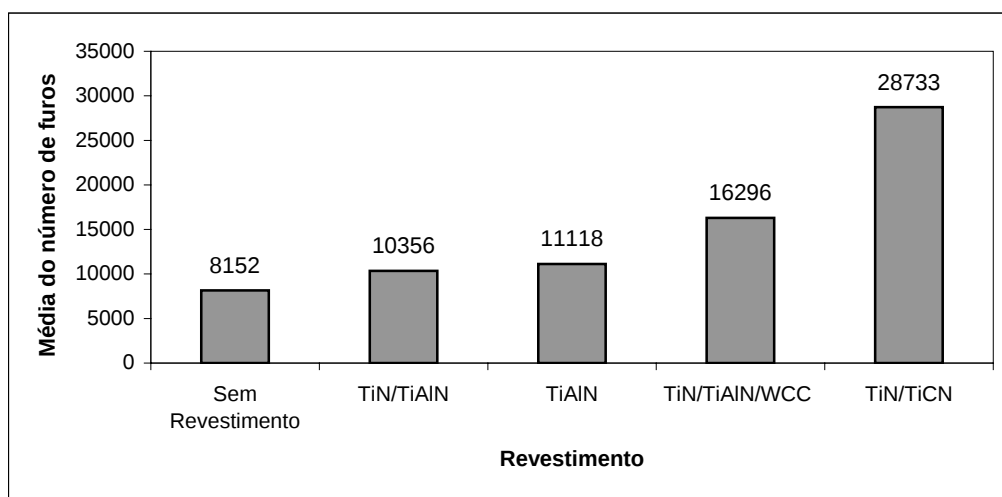


Figura 4 – Vida das ferramentas expressa em número de furos.

As conclusões dos resultados obtidos devem ser analisadas com cautela, levando-se em consideração que os valores de vida da ferramenta podem sofrer alterações significativas com a mudança das condições de corte e no tipo de material usinado. Neste trabalho a escolha dos revestimentos partiu das peculiaridades do material que seria usinado. A composição química da liga alumínio-silício mostra características de um material abrasivo, portanto, a escolha de revestimentos com elevada dureza foi a escolha mais acertada pela possibilidade de uma maior resistência ao desgaste. E deste modo, como a dureza dos revestimentos testados são próximas, segundo informações dos fabricantes, é possível que a diferença entre o desempenho destes esteja vinculada ao processo de deposição e a estrutura e arquitetura do revestimento.

A estrutura multicamadas e arquitetura do revestimento TiN/TiCN, mostrou ser a mais eficiente em aplicações agressivas como neste caso. A deposição de estruturas multicamadas, de espessuras variáveis, constitui um meio de se obter revestimentos com composição química, microestrutura e propriedades mecânicas e tribológicas especialmente projetadas. Normalmente, é possível obter nesses revestimentos dureza e resistência ao desgaste superior às de cada uma das camadas constituintes em separado. A deposição multicamadas é feita com o intuito de facilitar a adesão entre o revestimento e o substrato e de obter revestimentos de baixa reatividade química, baixo coeficiente de atrito, alta dureza e alta resistência ao desgaste (Tschiptschin, 2004).

As excelentes propriedades dos revestimentos multicamadas tem sido explicadas, baseadas nas diferenças entre os módulos de elasticidade dos dois materiais, nos efeitos de tensões e deformações elásticas devidas ao desajuste de reticulados cristalinos e na restrição à movimentação de discordâncias interposta pelas interfaces (Tschiptschin, 2004).

Verifica-se então que o bom desempenho do TiN/TiCN-multicamadas é o somatório das melhores características de cada camada. As características do TiN já foram amplamente discutidas em diversos trabalhos, o bom balanço entre suas propriedades lhe garante *status* de um revestimento universal para diversas aplicações. O TiCN apresenta uma estrutura compacta e homogênea, tendo um bom equilíbrio entre as propriedades de dureza e tenacidade, atuando como amortecedor para a penetração de trincas não deixando que estas se propaguem até o substrato, garantindo assim que o revestimento não seja destacado tão facilmente, principalmente nas guias cilíndricas já que foi essa região que levou ao comprometimento da ferramenta com redução de seu diâmetro devido ao desgaste acentuado e como consequência comprometeu a qualidade do furo.

Em relação ao menor número de furos realizados pelas ferramentas revestidas de TiAlN, TiN/TiAlN e TiN/TiAlN/WCC, a figura 5 evidencia claramente que o processo de deposição do revestimento pode ter uma influencia significativa no desempenho da ferramenta. As fotos mostradas deixam bem claro o destacamento da camada de TiAlN (preta), provavelmente diminuindo o desempenho das ferramenta revestidas de TiN/TiAlN, figura 5 (e)/(f), e TiN/TiAlN/WCC, figura 5 (g)/(h), já que com o destacamento do TiAlN a ferramenta passou a

usinar com a camada de TiN (dourada) que oferece menor resistência a ação continuada das partículas abrasivas presentes no sistema. Em relação às brocas revestidas de TiAlN-monocamada o revestimento foi arrancado junto com o substrato da ferramenta não suportando o efeito do desgaste abrasivo.

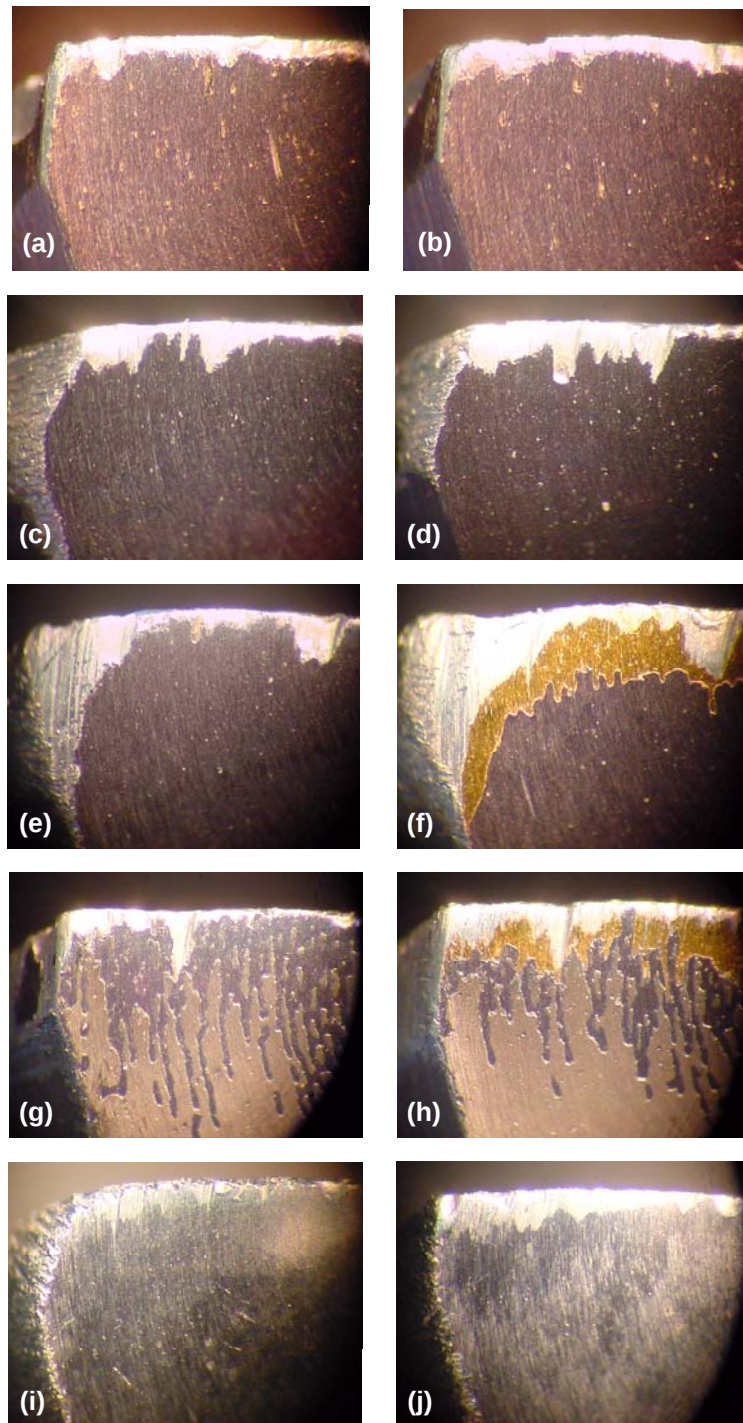


Figura 5 – Aspectos das pontas de corte das brocas revestidas de TiN/TiCN (a)/(b), TiAlN (c)/(d), TiN/TiAlN (e)/(f) e TiN/TiAlN/WCC (g)/(h), e sem revestimento (i)/(j) após o fim de vida.

3.2. Ensaio de Força de Avanço

A figura 6 mostra os resultados obtidos nos ensaios de força de avanço para todas as ferramentas testadas.

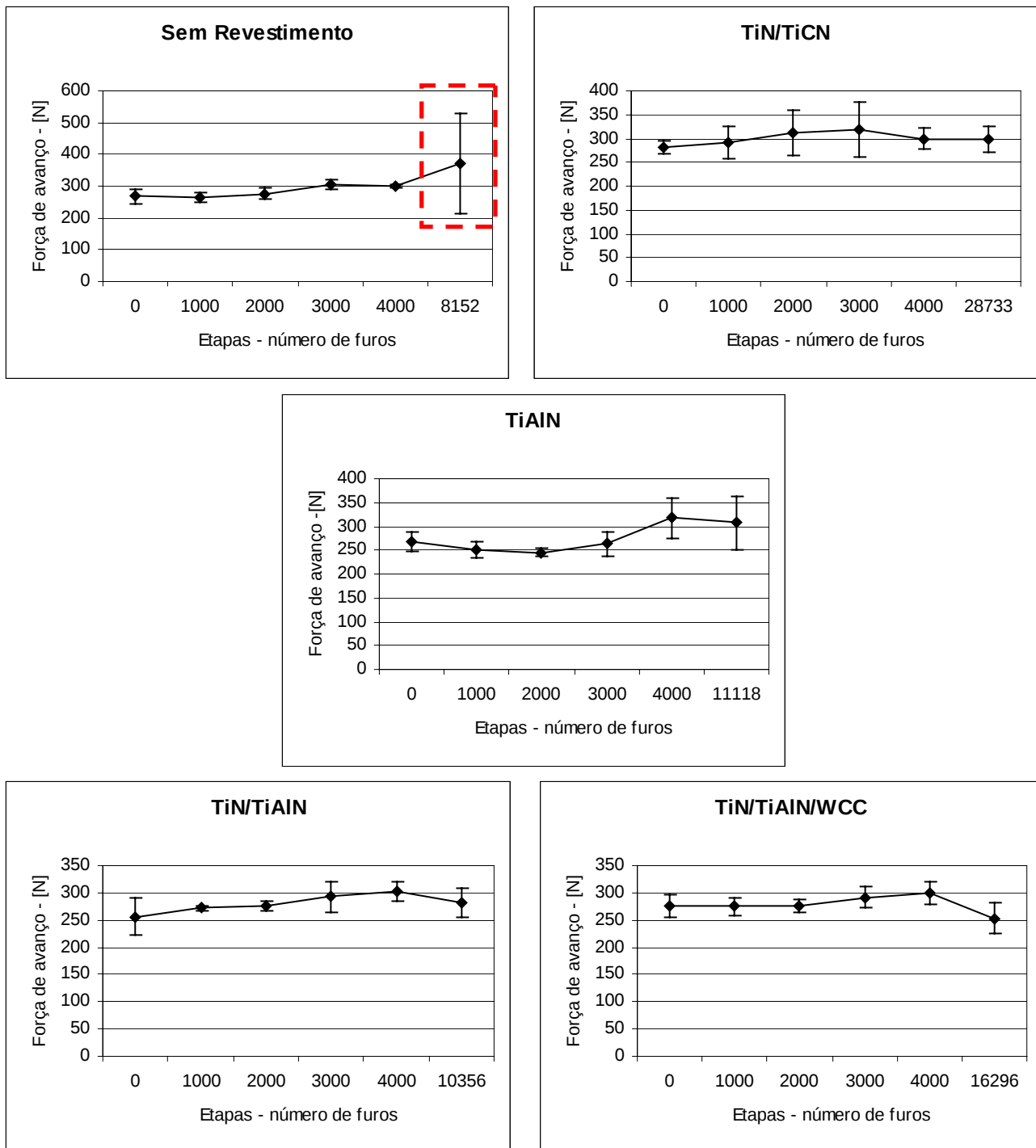


Figura 6 – Resultados obtidos nos ensaios de força de avanço para as ferramentas sem revestimento e revestidas de TiN/TiCN, TiAlN, TiN/TiAlN e TiN/TiAlN/WCC.

Observa-se que os valores de força obtidos nas ferramentas sem revestimento, revestidas de TiN/TiAlN e TiN/TiAlN/WCC até 4000 furos são praticamente os mesmos, com a ressalva de que para as ferramentas do grupo sem revestimento há uma menor dispersão da média. Já no fim de vida das ferramentas sem revestimento o valor médio da força de avanço está muito acima dos valores médios das ferramentas revestidas de TiN/TiAlN e TiN/TiAlN/WCC, e até mesmo dos outros revestimentos, como é destacado pela linha tracejada no gráfico sem revestimento. Esse aumento acentuado no valor médio da força de avanço das ferramentas sem revestimento deve-se a deformação plástica ocorrida na aresta transversal de uma das brocas deste grupo, figura 7(a), o que possibilitou “picos” de força de até 600 N na região de furo em cheio, ou seja, utilizando toda a ponta da broca na usinagem, como mostra o gráfico da figura 7 (b).

A influência do desgaste na aresta transversal é muito sensível nos valores de força, pois nessa região da broca a velocidade é praticamente zero e como a broca está sendo comprimida contra a peça o aumento na área de contato entre a ferramenta e a peça, devido ao desgaste, provoca a elevação da força.

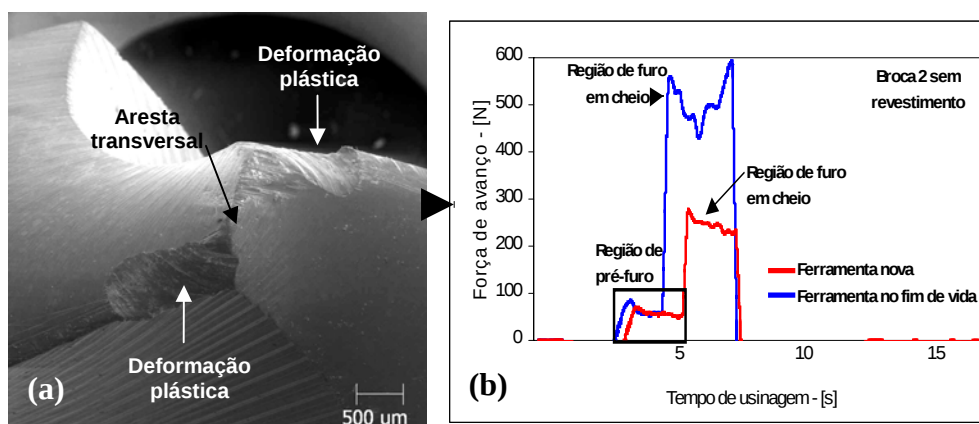


Figura 7 – Efeito do desgaste da aresta transversal de corte da broca 2 sem revestimento na força de avanço.

Já as ferramentas revestidas de TiN/TiCN e TiAlN apresentaram comportamentos diferentes em relação as outras ferramentas até 4000 furos. As ferramentas revestidas de TiN/TiCN apresentaram maiores valores de força, enquanto as ferramentas revestidas de TiAlN menores. Essa diferença no comportamento das ferramentas revestidas de TiAlN e TiN/TiCN pode estar ligada a capacidade do material da peça em aderir na superfície da ferramenta em virtude da afinidade química entre o titânio dos revestimentos e os elementos constituintes da liga usinada, e possivelmente poderia ser maior na ferramenta revestida de TiN/TiCN do que nos outros revestimentos. Segundo Coldwell et al. (2004) os chamados revestimentos duros, como o TiAlN e o TiCN utilizados neste trabalho, oferecem benefícios limitados na prevenção da adesão do material da peça na ferramenta, que é um dos problemas principais associado com a usinagem de alumínio tanto a seco quanto na presença de fluido de corte.

Outro fator que poderia influenciar nestes valores de força estaria vinculado ao material da peça que apresenta porosidades e vazios em sua estrutura por se tratar de uma liga fundida sob pressão. Eventualmente na usinagem de um furo nestas condições há a possibilidade da ferramenta usinar em vazio, e como consequência há uma diminuição nos valores de força como poderia ter ocorrido com maior frequência com as ferramentas revestidas de TiAlN. Observa-se também que no fim de vida das ferramentas revestidas há uma tendência na diminuição dos valores de força, que pode ter sido provocada pelo empastamento de alumínio nas ferramentas e porosidade do material.

De maneira geral, os resultados mostraram que os revestimentos aumentam a vida útil das ferramentas em relação à ferramenta sem revestimento, mas não promovem a diminuição do atrito na interface ferramenta/peça, não possibilitando a diminuição dos valores de força de avanço de maneira eficiente, possivelmente por dois fatores: devido à afinidade química que há entre o revestimento e o material da peça principalmente pela presença de titânio no revestimento e também as condições de corte em que estes revestimentos estão sendo utilizados, pois seguramente cada revestimento tem uma faixa de utilização que o torna mais adequado para certas operações.

3.3. Ensaios de Caracterização de Revestimentos por Indentação Rockwell C

A figura 8 mostra as impressões após as indentações, em algumas ferramentas revestidas.

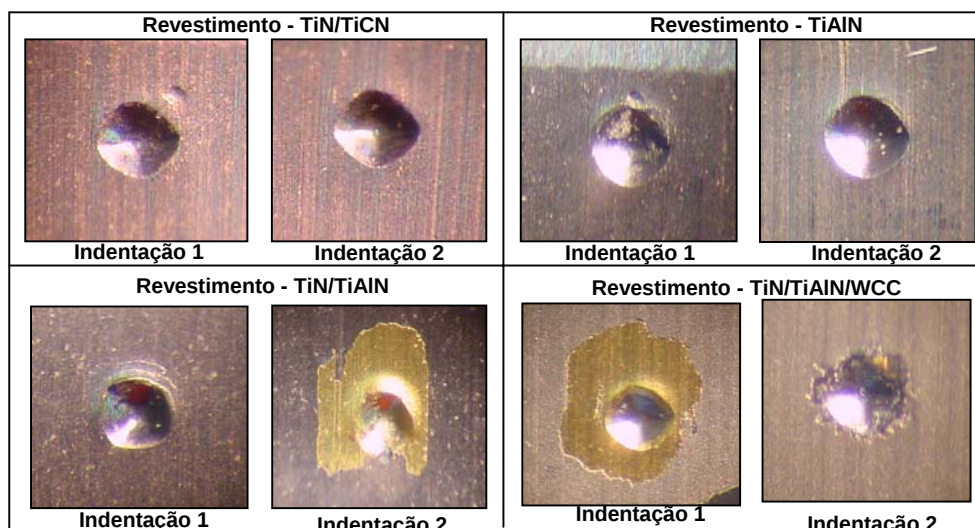


Figura 8 – Indentações obtidas no teste de adesão Rockwell C em posições diametralmente opostas na haste cilíndrica das brocas revestidas, (x40).

Conforme figura 8 com o pouco aumento utilizado, 40 vezes, não é possível averiguar plenamente as bordas das impressões deixadas nas brocas revestidas de TiN/TiCN e TiAlN quanto a possíveis trincas formadas, o que se pode afirmar é que não houve destacamento do revestimento, como nas indentações 1 e 2 das brocas revestidas de TiN/TiAlN/WCC e TiN/TiAlN, respectivamente. Na indentação 1 da broca revestida de TiN/TiAlN houve trincas circulares ao redor da impressão e na indentação 2 houve delaminação do TiAlN. Para a broca revestida de TiN/TiAlN/WCC na indentação 1 ocorreu delaminação do revestimento TiAlN e na indentação 2 é observado pequena delaminação e trincas nas camadas de revestimentos WCC e também TiAlN. É interessante lembrar que as indentações foram feitas em posições diametralmente opostas na região plana da haste cilíndrica, os revestimentos TiN/TiCN e TiAlN mantiveram a mesma característica nas impressões deixadas, ao passo que nos revestimentos TiN/TiAlN e TiN/TiAlN/WCC houve diferenciação no modo de fratura do revestimento o que leva a concluir que possivelmente poderia não haver homogeneidade no processo de deposição das camadas de revestimentos sobre o substrato da ferramenta. Segundo o fabricante, pode haver uma variação na espessura dos revestimentos depositados, e o motivo da variação normalmente é a geometria, ou as diferentes geometrias na mesma carga. Ainda segundo o fabricante há meios fáceis de atingir camadas com precisão e com mínima variação de espessura, mas isso tipicamente exige que a carga seja montada com peças de geometrias idênticas ou similares.

Os resultados obtidos nos ensaios de adesão Rockwell C mostraram que mesmo fora da área de usinagem das brocas TiN/TiAlN e TiN/TiAlN/WCC evidencia-se claramente o destacamento da camada de TiAlN, isso mostra que há uma pobre adesividade da camada sobre o corpo da ferramenta, ou melhor, sobre o revestimento base de TiN. Já para a ferramenta TiN/TiCN as impressões deixadas mostram a ótima adesividade do revestimento sobre o substrato de aço-rápido o que justifica o seu melhor desempenho nos ensaios de vida.

4. CONCLUSÕES

- Todas as brocas de aço-rápido revestidas apresentaram desempenho superior ao das ferramentas sem revestimento em termos de vida.
- Entre as brocas revestidas o melhor desempenho foi do revestimento TiN/TiCN que possibilitou a usinagem de maior número de furos.
- O uso dos revestimentos estudados não influenciaram, de maneira significativa, nos valores de força de avanço em comparação a ferramenta sem revestimento.

- Os ensaios de indentação Rockwell C mostraram a pobre adesão do revestimento TiAlN depositado sobre o TiN e a melhor adesão do TiN/TiCN que justifica o seu melhor desempenho nos ensaios de vida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e Instituto Fábrica do Milênio, CAPES e FIAT- Powertrain Technology pelo suporte financeiro e técnico na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Coldwell, H.L., Dewes, R.C., Aspinwall, D.K., Renevier, N.M. and Teer, D.G., 2004, "The Use of Softy Lubricating Coatings when Dry Drilling BS L168 Aluminium Alloy", Surface and Coatings Technology, vol. 177-178, pp. 716-726.
- Cselle, T. and Barimani, A., 1995, "Today's Applications and Future Developments of Coatings for Drills and Rotating Cutting Tools", Surface and Coatings Technology, vol. 712, pp. 76-77.
- Pflüger, E., Schröer, A., Voumard, P., Donohue, L. and Münz, W., 1999, "Influence of Incorporation of Cr and Y on the Wear Performance of TiAlN Coatings at Elevated Temperatures", Surface and Coatings Technology, vol. 115, pp. 17-23.
- Santos, S.C., Sales, W.F., Da Silva, F.J., Franco, S.D. and Da Silva, M.B., 2004, "Tribological Characterization of PVD Coatings for Cutting Tools", Surface and Coatings Technology, vol. 184, pp. 141-148.
- Tschiptschin, A.P., 2004, "Relação Estrutura-Propriedades em Recobrimentos Duros", Metalurgia & Materiais, pp. 167-169.

DRILLING OF ALUMINUM-SILICON ALLOY WITH COATED HSS DRILLS

Rhander Viana

Federal University of Uberlândia, Laboratory for Teaching and Research in Metal Cutting, LEPU, Av. João Naves de Ávila, nº 2160, 38400-089, Uberlândia, MG, rviana@mecanica.ufu.br

Álison Rocha Machado

Federal University of Uberlândia, Laboratory for Teaching and Research in Metal Cutting, LEPU, Av. João Naves de Ávila, nº 2160, 38400-089, Uberlândia, MG, alissonm@mecanica.ufu.br

Abstract: *Generally, the coatings allow improvements on the cutting conditions, reduction friction in the chip-tool interface and increase the wear resistance of the tools, increasing tool life. In this work TiN/TiCN, TiAlN, TiN/TiAlN and TiN/TiAlN/WCC coatings were tested in drilling of the aluminum-silicon alloy ISO 3522 Al-Si8Cu3Fe used by the automotive industry. Uncoated drills were also tested for comparison purposes, and a cutting fluid was always used. Tool life expressed in number of machined holes, thrust force and adhesion of the coatings were the parameters considered. The adhesivity of the coatings was determined by Rockwell C indentation test. The results showed that the coated tools were always better in terms of tool life, than the uncoated ones. The best coating, in terms of tool life was the TiN/TiCN followed by TiN/TiAlN/WCC, TiAlN and TiN/TiAlN. The thrust force varied only within a narrow range for these coated and uncoated twist drills. Regarding to adhesion tests, TiN/TiCN and TiAlN showed better adhesion on the substrate of high-speed steel grade M2.*

Keywords: *coatings, drilling, aluminum-silicon alloy, coating adhesion, high-speed steel.*