



## **CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA DE REVESTIMENTOS APLICADOS A FERRAMENTAS DE CORTE**

### **Flávio José da Silva**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LTM, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Bloco 1R - Santa Mônica, Uberlândia, MG , ([fjsilva@mecanica.ufu.br](mailto:fjsilva@mecanica.ufu.br)).

### **Sandro Cardoso Santos**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LPU, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([scsantos@mecanica.ufu.br](mailto:scsantos@mecanica.ufu.br)).

### **Washington Martins da Silva Junior**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LTM, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Bloco 1R - Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([washington@mecanica.ufu.br](mailto:washington@mecanica.ufu.br)).

### **Sinésio Domingues Franco**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LTM, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Bloco 1R - Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([ltm-sdfranco@ufu.br](mailto:ltm-sdfranco@ufu.br)).

### **Marcio Bacci da Silva**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LPU, Universidade Federal de Uberlândia,  
Av João Naves de Ávila, 2160, Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([mbacci@mecanica.ufu.br](mailto:mbacci@mecanica.ufu.br)).

**Resumo:** *A grande diversidade de revestimentos disponíveis no mercado e a tendência atual de utilização de ferramentas revestidas nos processos de usinagem levam à necessidade de se classificar tais revestimentos com relação ao desempenho das ferramentas de corte. O ideal e lógico para essa classificação é a utilização de ensaios de usinagem em faixas de condições de corte recomendadas e tomando-se como base à vida das ferramentas de corte. Porém, ensaios de usinagem envolvem custos consideráveis e demandam tempo, fatores que justificam a busca por ensaios alternativos, que forneçam resultados em um curto intervalo de tempo e a custos menores. O ensaio de microabrasão nesse caso mostra-se como uma alternativa promissora ao estudo de ferramentas revestidas podendo auxiliar o estudo do desgaste de ferramentas de corte. O ensaio utiliza o princípio da rotação de uma esfera de aço sobre uma superfície de teste com uma mistura abrasiva conduzida até a interface dos dois corpos. Como resultado tem-se a impressão de uma calota sobre a superfície testada. A medição do diâmetro da impressão gerada pela esfera é usada na determinação, no caso de superfícies revestidas, da espessura do revestimento bem como dos coeficientes de desgaste do substrato e do revestimento, simultaneamente. Neste trabalho foram determinados as espessuras e coeficientes de desgaste de quatro tipos de revestimentos aplicados em brocas helicoidais de aço-rápido e quatro tipos aplicados sobre brocas de metal duro integral. A classificação dos revestimentos quanto ao desgaste de microabrasão foi comparada com os valores de vida de ferramenta obtidos em ensaios de furação.*

**Palavras-chave:** *Microabrasão, revestimento, furação.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os revestimentos para ferramentas de corte surgiram no final da década de 1960 como uma alternativa para melhorar a resistência ao desgaste sem que isso implicasse na redução de sua tenacidade. A deposição de revestimentos tem como principal finalidade o aumento da vida das ferramentas. Outros efeitos positivos, tais como o aumento da velocidade de corte (e em consequência da produtividade), redução das forças de corte (potência consumida) e redução da tendência à adesão podem também ser obtidos, Hogmark et. al (2000). A evolução dos materiais de revestimentos e das técnicas de deposição resultou nos principais tipos de revestimento disponíveis na atualidade. Dentre os revestimentos utilizados em brocas helicoidais podem ser destacados o TiN, TiCN, TiAlN e o revestimento multicamadas. O TiN apresenta como principal característica o bom desempenho na usinagem de uma grande variedade de materiais, característica que o torna recomendado para situações em que vários materiais são usinados por uma mesma ferramenta. O TiCN é indicado para a usinagem de materiais com elevada tenacidade. Sua estrutura impede que uma trinca originada na superfície se propague até o substrato. O TiAlN é adequado para a usinagem de materiais que possuem componentes abrasivos, como o ferro fundido e as ligas Al-Si. Além de melhorar a resistência ao desgaste das ferramentas, os revestimentos podem agir como lubrificantes. Entre os revestimentos desenvolvidos com essa finalidade pode-se destacar o WC/C e o MoS<sub>2</sub>. O revestimento multicamadas é formado por camadas alternadas de TiN, TiCN e TiAlN e tem por objetivo reunir os aspectos positivos de cada constituinte.

A grande variedade de revestimentos disponíveis, aplicados a diferentes substratos, demanda o desenvolvimento de técnicas de caracterização de suas propriedades, de modo especial a resistência ao desgaste. A metodologia mais utilizada para a avaliação do desempenho de revestimentos aplicados a ferramentas de corte é a realização de ensaios de usinagem. Esses ensaios, contudo, são demorados e dispendiosos, o que dificulta a obtenção de resultados confiáveis do ponto de vista estatístico. O ensaio de microabrasão é uma alternativa viável devido a sua capacidade de fornecer resultados em um intervalo de tempo relativamente curto. O ensaio é realizado em uma região pequena o suficiente para permitir que vários ensaios sejam feitos em uma mesma amostra, o que contribui para a redução dos custos. O ensaio de microabrasão não exige a preparação da amostra e permite a obtenção simultânea dos coeficientes de desgaste do revestimento e do substrato, além da espessura dos revestimentos. Os coeficientes de desgaste expressam o volume de material removido por unidade de deslocamento por unidade de carga aplicada.

Este trabalho tem como objetivo relacionar os resultados obtidos em ensaios de furação com brocas de aço-rápido e metal duro revestidas com os obtidos nos ensaios de microabrasão, realizados nessas ferramentas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Testes de usinagem

Foram realizados ensaios de furação em uma fresadora ROMI INTERACT IV, com potência de 16 KW, com capacidade de rotação de 40 a 4000 rpm. Foram realizadas seqüências de furos ininterruptas até que as ferramentas atingissem o fim de vida.

Os testes foram feitos com brocas de 10 mm de diâmetro de aço-rápido e de metal duro, com diferentes revestimentos, mostrados na Tab. (1).

Tabela 1 – Revestimentos analisados

Substrato		Revestimento		
Aço rápido (HSS)	WC/C-TiAlN	TiCN	TiN	MC*
Metal duro (MD)	MoS <sub>2</sub> -TiN	TiAlN	TiN	MC*

\* MC - Multicamadas

O material usinado foi o ferro fundido cinzento GH 190 na forma de barras de 500 X 200 X 45 mm. Os valores de vida das ferramentas foram obtidos a partir da média de três ensaios. O comprimento em balanço das brocas, a posição da peça e a altura da mesa da fresadora foram mantidos constantes. Os ensaios foram realizados com aplicação de mínima quantidade de fluido de corte, 50 ml/h (1 pulso/segundo). As condições de corte adotadas são mostradas na Tab. (2).

Tabela 2 – Condições de corte adotadas para os ensaios de usinagem

	Aço-rápido	Metal duro
Vc (m/min)	35	110
f (mm/volta)	0,25	0,25
Comprimento/diâmetro	4,5	4,5

As superfícies das brocas após os ensaios de usinagem foram analisadas com Microscopia eletrônica de varredura com o objetivo de determinar os tipos e as formas de desgaste presentes. Foram observadas as seguintes regiões propensas a sofrer desgaste: ponta da broca, superfície principal de folga, próximo à ponta de corte e guia cilíndrica.

## 2.2. Teste de Microabrasão

Os ensaios de desgaste abrasivo foram executados em um equipamento de microabrasão apresentado na Fig.(1). Neste, a rotação de um eixo motor, fixada em 150 RPM, faz girar sobre a amostra uma esfera de aço temperado de diâmetro de 25,4 mm. Através de uma bomba peristáltica uma mistura abrasiva de Carboneto de Silício com 5 µm de diâmetro médio, é bombeada sobre a esfera a uma vazão de cerca de 1 gota a cada 3 segundos. A carga de teste é determinada por uma celular de carga, e ajustada pela massa da esfera, bem como pela inclinação da mesa porta-amostra e pela posição do conjunto em relação ao eixo motor, e nestes testes foi mantida em valores entre 0,36 e 0,40 N.

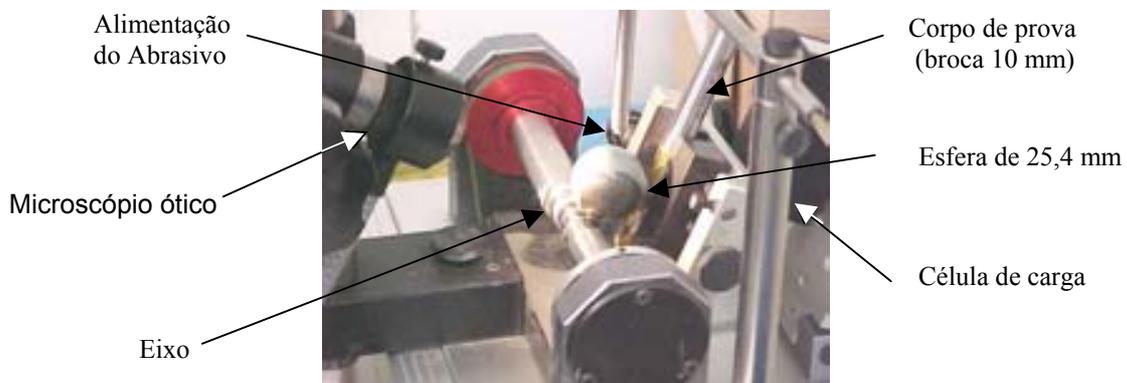


Figura 1. Aspecto geral do ensaio de microabrasão “calowear”

A concentração de abrasivo usada foi na proporção de 15g para 100 ml de água destilada. Este valor foi determinado com base na literatura, Trezona (2000), e em resultados de testes preliminares realizados com objetivo garantir um mecanismo de desgaste abrasivo a dois corpos, tipo de desgaste verificado nos testes de usinagem.

Os coeficientes de desgaste do substrato e do revestimento para superfícies cilíndricas são determinados pela Eq.(1), Hutchings (1997).

$$\frac{L \cdot F_N}{b^4} \left( \frac{R+r}{r} \right)^{1/2} = \left( \frac{K_s - K_c}{K_s \cdot K_c} \right) \left( \frac{\pi t}{4b^4} - \frac{\pi R \cdot t^2}{b^4} \right) + \left( \frac{1}{K_s} \right) \left( \frac{\pi}{64R} \right) \quad (1)$$

Onde :  $R$  representa o raio da esfera utilizada,  $b$  a soma de  $x$  e  $y$  no maior eixo da elipse, Fig.(2),  $L$  a distância percorrida pela esfera no contato,  $F_N$  a força normal na amostra,  $r$  representa o raio da superfície cilíndrica (no caso, o raio da broca),  $t$  representa a espessura do revestimento,  $k_S$  o coeficiente de desgaste do substrato e  $k_C$  o coeficiente de desgaste do revestimento

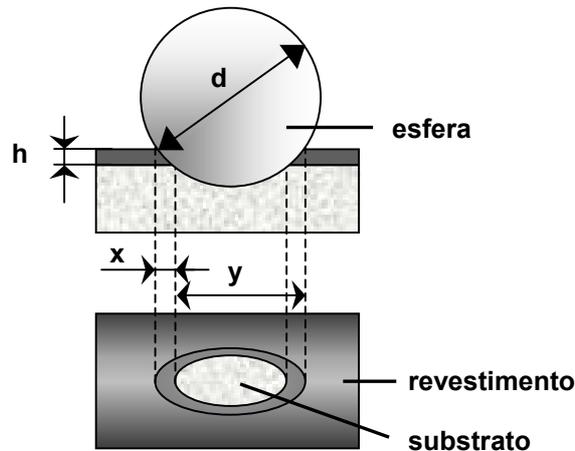


Figura 2. Representação esquemática da calota elíptica obtida sobre uma superfície cilíndrica em ensaios de microabrasão.

Os valores de  $x$  e  $y$ , mostrados na Fig. (2) foram medidos em um microscópio ótico acoplado ao equipamento, Fig. (1). As medições de  $x$  e  $y$  foram efetuadas sem a remoção da amostra da mesa de teste. Em cada broca foram realizados os ensaios em pelo menos 3 posições diferentes. Em cada posição pelo menos uma seqüência de três medições. Houve uma variação de tempo de duração de cada teste de acordo com o tipo de revestimento da broca.

Foram analisados quatro tipos de revestimentos depositados em brocas de metal duro e de aço rápido totalizando em oito tipos de combinações revestimentos/substratos (Tabela 1).

Os ensaios de microabrasão foram realizados em uma região revestida da haste das brocas, como observado na Fig.(3). Após os ensaios, as impressões geradas nas superfícies das brocas foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura para identificação do mecanismo de desgaste predominante.

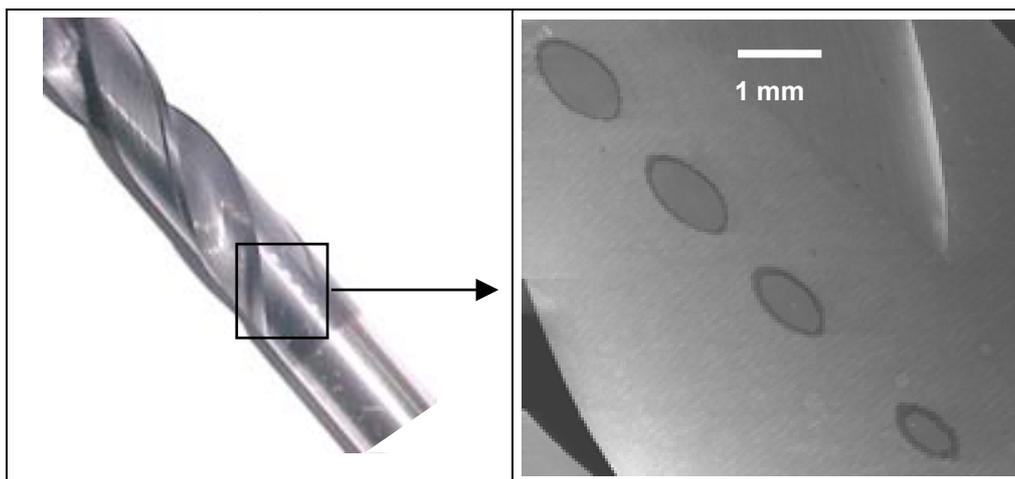


Figura 3. Região de realização dos ensaios de microabrasão.

### 3. RESULTADOS

A análise das fotografias das regiões de desgaste permitiu identificar que o mecanismo de desgaste predominante foi abrasão a dois corpos. Pôde-se verificar a presença de material aderido entre a superfície secundária de folga e a superfície de saída. Essa tendência foi mais acentuada na ferramenta com o revestimento multicamadas e menos pronunciado na ferramenta revestida com

TiN. Como todas as amostras apresentaram desgaste acentuado da guia cilíndrica, pode-se afirmar que a ferramenta executou furos após a remoção do revestimento nessa região, com isso, nenhuma relação entre o revestimento e a tendência de adesão de material fica evidente. O aspecto típico da guia cilíndrica na região próxima à ponta de corte da ferramenta pode ser observada na Fig.(4).

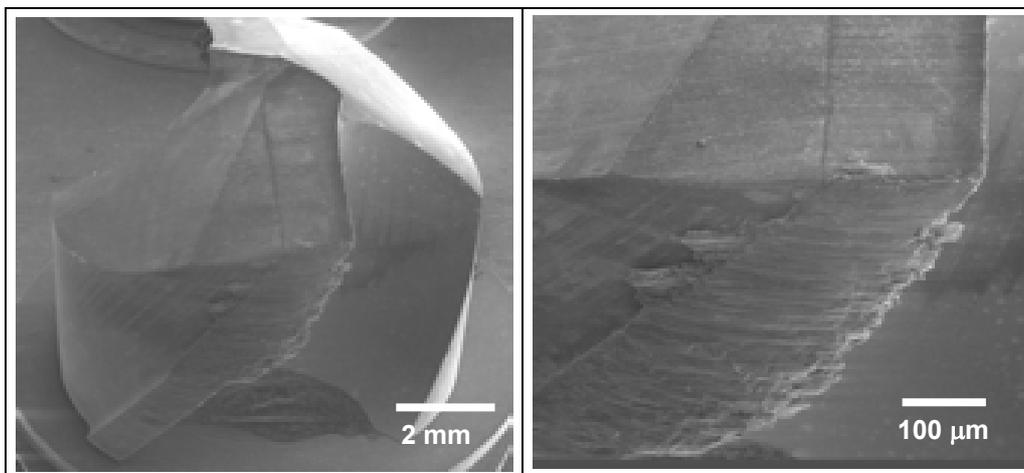


Figura 4. Aspecto da guia cilíndrica na região próxima à ponta de corte da ferramenta de HSS-WC/C sobre TiAlN.

Na Figura (5) observa-se o aspecto típico das impressões geradas sobre a superfície revestida das brocas após os ensaio de microabrasão. Verifica-se a evolução do tamanho da elipse formada com 2, 4, 6 e 8 minutos do revestimento de WC/C-TiAlN sobre uma broca de aço rápido.

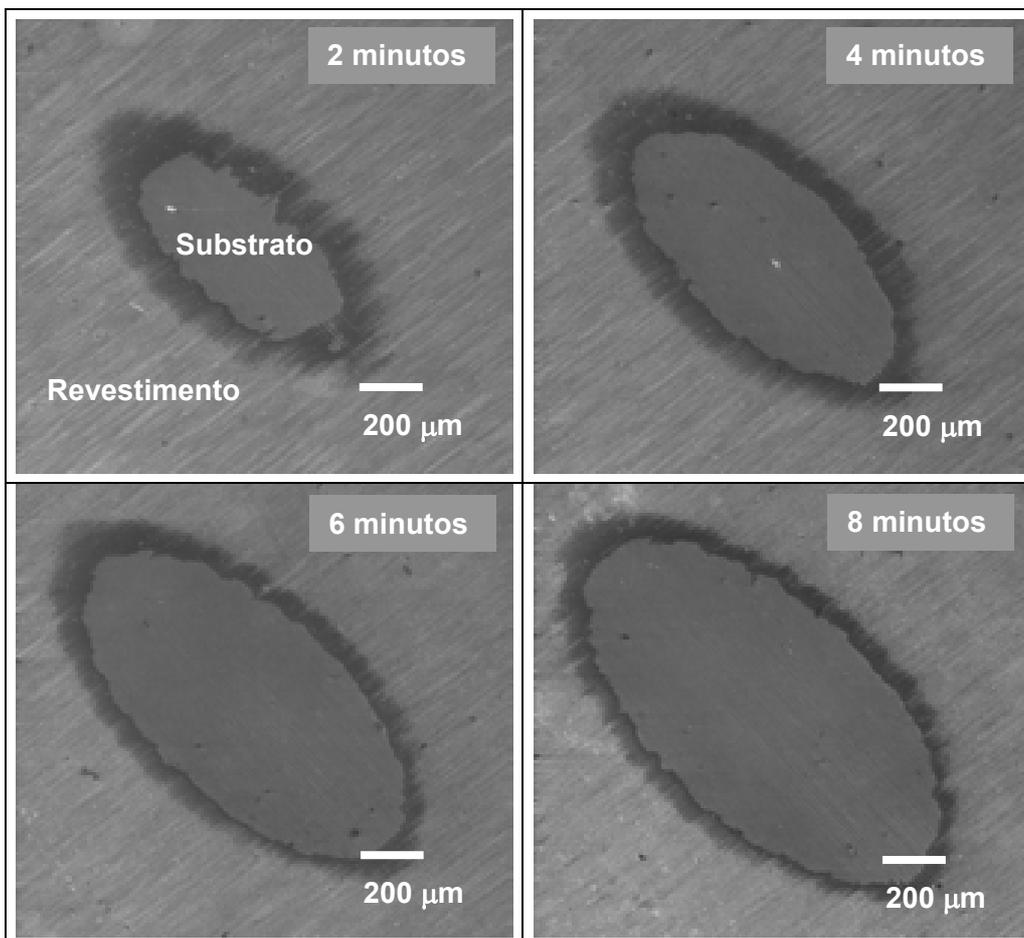


Figura 5.- Evolução do tamanho da elipse formada com 2, 4, 6 e 8 minutos do revestimento de WC/C-TiAlN sobre uma broca de aço rápido.

O mecanismo de desgaste observado nos ensaios foi o desgaste abrasivo a dois corpos (riscamento), Fig. (6).

O desempenho das ferramentas revestidas não depende apenas da composição química do revestimento. Posti et al (1989) ao avaliar a influência da espessura do revestimento no desempenho das ferramentas, verificaram a existência de uma espessura ótima de para o corte interrompido e que, no corte contínuo, o desempenho das ferramentas é tanto melhor quanto maior for a espessura dos revestimentos. Young e Rhee (1986) verificaram que a vida das brocas cresce linearmente com a espessura do revestimento de TiN.

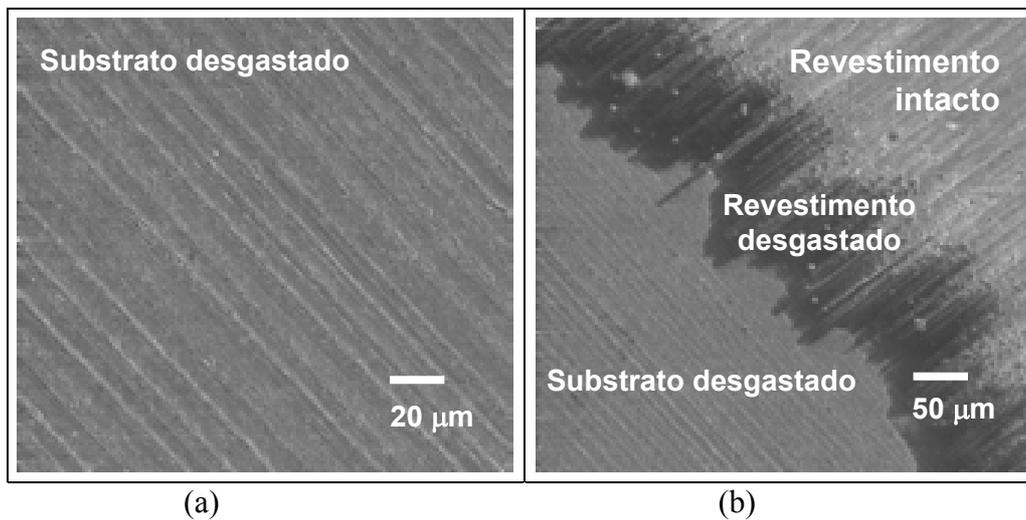


Figura 6 – Superfície de desgaste HSS-WC/C-TiAlN, (a) região central da elipse, (b) região lateral da elipse.

Derflinger et al (1999) mostraram resultados de desempenho de revestimentos na furação com base no número de furos usinados por micrometro de espessura da camada de revestimento. Essa mesma relação será adotada para a apresentação dos resultados.

A Figura 7(a) mostra o desempenho dos revestimentos depositados nas brocas de aço-rápido e a Fig. 7(b) mostra os valores do coeficiente de desgaste obtidos por meio do ensaio de microabrasão.

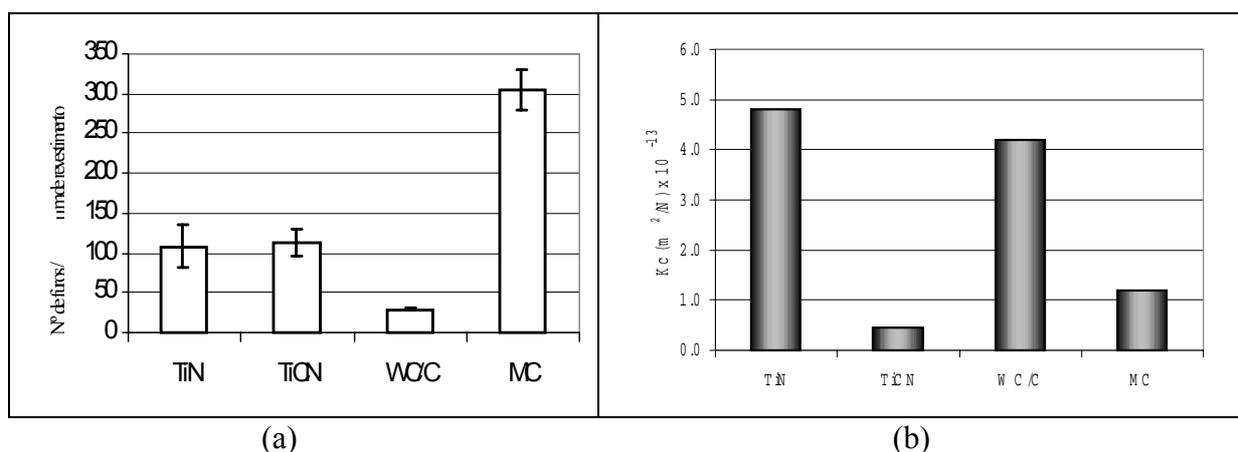


Figura 7. Caracterização dos revestimentos depositados sobre brocas de aço-rápido: (a) ensaio de furação; (b) coeficientes de desgaste

Os resultados da Fig. 7(a) mostram que a superioridade do desempenho do revestimento multicamadas. O resultado referente ao revestimento WC/C sobre TiAlN refere-se à espessura total

da camada revestida, uma vez que o ensaio para medição da espessura considera os dois revestimentos como se fossem uma única camada. Os resultados apresentados por Derflinger et al (1999) consideram a espessura apenas da camada dura de revestimento. Com base na Fig. (8), pode-se verificar que a espessura da camada dura (TiAlN) corresponde à aproximadamente 60% da espessura total. Se consideramos apenas a espessura do TiAlN, o desempenho do revestimento assumiria valores próximos aos obtidos para o TiN e TiCN. Apesar de sua elevada resistência ao desgaste, que o torna indicado para a usinagem do ferro fundido cinzento, a pequena resistência à deformação do TiAlN prejudica o seu desempenho, quando depositado sobre ferramentas de aço-rápido.

O TiCN apresenta como principal vantagem a elevada resistência à deformação, propriedade que é especialmente desejável na furação com brocas de aço-rápido. O comportamento próximo ao do TiN confirma essa afirmação.

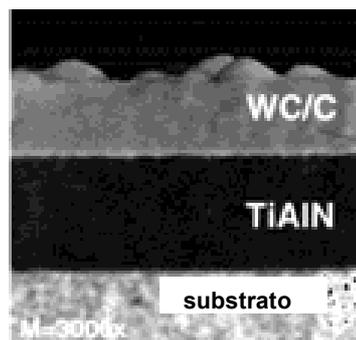


Figura 8. Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do revestimento WC/C sobre TiAlN em substrato de metal duro, Derflinger et al (1999).

Os valores próximos de coeficiente de desgaste do TiN e do WC/C sobre TiAlN, Fig. (8), e o baixo coeficiente de desgaste verificado para o revestimento multicamadas (MC) concordam com os valores apresentados na Fig. 7(a), desde que seja considerada apenas a espessura da camada de TiAlN do revestimento WC/C. O coeficiente de desgaste do TiCN não apresentou relação com o resultado de número de furos/espessura de revestimento.

A Figura (9) apresenta o desempenho dos revestimentos depositados sobre brocas de metal duro.

Os resultados apresentados na Fig. 9(a) destacam o melhor desempenho do TiAlN e do revestimento multicamadas (MC). O resultado obtido para o TiAlN confirma a sua indicação para a usinagem do ferro fundido cinzento.

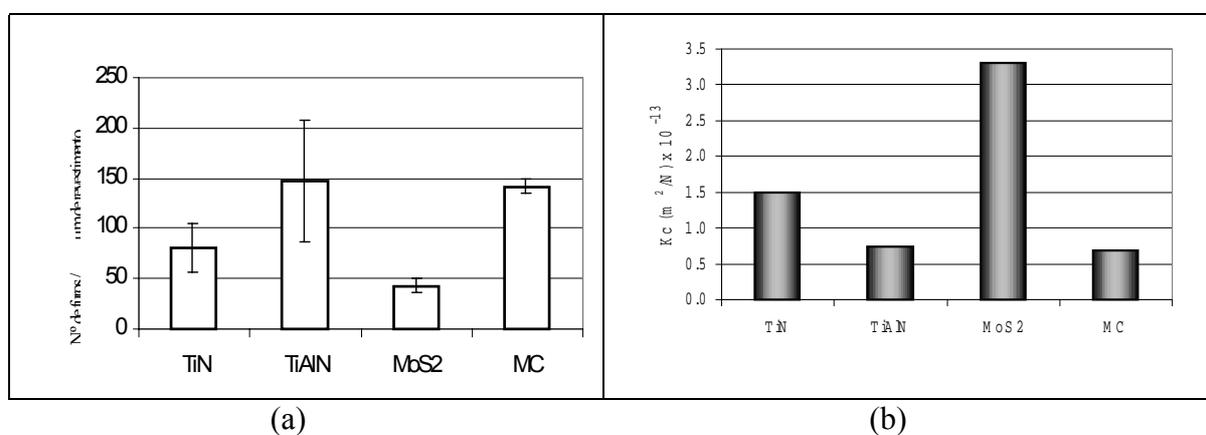


Figura 9. Caracterização dos revestimentos depositados sobre brocas de metal duro: (a) ensaio de furação; (b) coeficientes de desgaste

Resultados apresentados por Cselle (1998) mostraram que brocas de aço-rápido revestidas com TiAlN apresentam pior desempenho quando comparadas a brocas revestidas com TiN, na furação de ferro fundido cinzento. Se depositado em ferramentas de metal duro o TiAlN passa a apresentar desempenho melhor que o TiN. De acordo com o autor essa situação é devida à baixa capacidade de deformação do TiAlN, que tende a fraturar-se quando depositado sobre o aço-rápido. No caso de o substrato ser o metal duro a resistência ao desgaste do TiAlN passa a ser o fator dominante.

A comparação dos desempenhos dos revestimentos de TiN e TiAlN mostra que o número de furos por  $\mu\text{m}$  de espessura do revestimento de TiN na furação com brocas de aço-rápido é maior que o realizado pelo TiAlN. Esse comportamento aparece invertido na furação com brocas de metal duro. Os resultados obtidos concordam com os obtidos por Cselle (1998).

Os coeficientes de desgaste obtidos para os revestimentos depositados sobre brocas de metal duro podem ser diretamente relacionados com os resultados de número de furos /espessura de revestimento. O revestimento de  $\text{MoS}_2$  apresentou o maior coeficiente de desgaste e a menor relação de número de furos/ $\mu\text{m}$  de espessura de revestimento. O segundo maior valor de coeficiente de desgaste, obtido para o revestimento de TiN, corresponde à segunda menor relação número de furos/ $\mu\text{m}$  de espessura de revestimento. Os revestimentos de TiAlN e multicamadas (MC) apresentaram os menores valores de coeficientes de desgaste e as maiores relações número de furos/ $\mu\text{m}$  de espessura de revestimento. Tanto o número de furos/ $\mu\text{m}$  de espessura de revestimento quanto os coeficientes de desgaste apresentaram valores próximos para o TiAlN e o revestimento multicamadas.

Os resultados mostram que, exceto para o revestimento de TiCN depositado sobre brocas de aço-rápido, pôde ser estabelecida uma boa relação entre o desempenho dos revestimentos na furação. Esses resultados mostram que o ensaio de microabrasão é uma alternativa para a caracterização de desempenho de revestimentos para ferramentas de corte.

#### 4. CONCLUSÕES

- O ensaio de microabrasão mostrou ser uma ferramenta útil para a caracterização de revestimentos depositados em brocas helicoidais.
- A caracterização dos revestimentos depositados sobre brocas de aço-rápido, com base no número de furos/micrometro de espessura de revestimento e no coeficiente de desgaste, apresentou correlação, exceto para o revestimento de TiCN.
- Os melhores resultados foram obtidos na análise dos revestimentos depositados nas brocas de metal duro. Os revestimentos que possibilitaram a realização maior número de furos por micrometro de espessura de camada de revestimento foram os que apresentaram menor coeficiente de desgaste. Os revestimentos de TiAlN e multicamadas apresentaram resultados próximos nos dois itens avaliados.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Cselle, T., 1998, "Carbide Drills: at the Peak of Development?", Guhing Company, 85 p.
- Derflinger, V., Brändle, H., Zimmermann, H., 1999, "New Hard/Lubricant Coating for Dry Machining", Surface and Coating Technology, Vol. 113, pp. 286 – 192.
- Hogmark, S., Jacobson, S., Larson, M., 2000, "Design and Evaluation in Tribological Coatings", Wear, Vol. 246, pp. 20–33.
- Posti, E., Nieminen, I., 1989, "Influence of Coating Thickness on the life of TiN-Coated High Speed Steel Cutting Tools", Wear, Vol. 129, pp. 273 – 283.
- Trezona R. I., Allsopp, D. N., Hutchings, I. M., 1999, "Transitions Between Two-Body and Three-Body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Micro scale Abrasive Wear Test", Wear, Vol. 225–229, pp. 205–214.
- Young, C. T., Rhee, S. K., 1986, "TiN Coatings on Drills for Wear Reduction", Wear, Vol. 7 (1), pp. 235 – 242.

# TRIBOLOGICAL CHARACTERIZATION OF PVD COATINGS FOR CUTTING TOOLS

## **Flávio José da Silva**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LTM, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Bloco 1R - Santa Mônica, Uberlândia, MG , ([fjsilva@mecanica.ufu.br](mailto:fjsilva@mecanica.ufu.br)).

## **Sandro Cardoso Santos**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LEPU, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([scsantos@mecanica.ufu.br](mailto:scsantos@mecanica.ufu.br)).

## **Washington Martins da Silva Junior**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LTM, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Bloco 1R - Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([washington@mecanica.ufu.br](mailto:washington@mecanica.ufu.br)).

## **Sinésio Domingues Franco**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LTM, Universidade Federal de Uberlândia, Av João Naves de Ávila, nº 2160, Bloco 1R - Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([ltm-sdfranco@ufu.br](mailto:ltm-sdfranco@ufu.br)).

## **Marcio Bacci da Silva**

Faculdade de Engenharia Mecânica, LEPU, Universidade Federal de Uberlândia,  
Av João Naves de Ávila, 2160, Santa Mônica, Uberlândia, MG, ([mbacci@mecanica.ufu.br](mailto:mbacci@mecanica.ufu.br)).

***Abstract.** The objective of this work is to compare different coatings for cutting tools, based on tool life during cutting and wear resistance, measured by a micro-scale abrasive test. Four types of PVD coatings were deposited on HSS and cemented carbide drills. The parameter used to determine tool life was the number of holes per thickness of the coating. A good correlation between drilling performance and wear coefficients was obtained, mainly for cemented carbide drills.*

***Keywords:** microabrasion, coatings, drilling.*